



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA  
SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA MEDIANTE EL USO  
DE HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS**

**AUTOR: MOLINA CUASAPAZ, GUILLERMO PAUL**

**DIRECTOR: DR. MASABANDA MARCO**

**SANGOLQUÍ**

**2011**

## 1 CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y MEDIO AMBIENTE**

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS**” realizado por el señor **MOLINA CUASAPAZ GUILLERMO PAUL**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **MOLINA CUASAPAZ GUILLERMO PAUL** para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 22 de febrero de 2016**



-----  
MARCO VINICIO MASABANDA CAISAGUANO

## 2 AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y MEDIO AMBIENTE**

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **MOLINA CUASAPAZ GUILLERMO PAUL**, con cédula de identidad N° 1722547260 declaro que este trabajo de titulación **“ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 03 de marzo de 2016**

-----  
GUILLERMO PAUL MOLINA CUASAPAZ

C.C 1722547260

### **3 AUTORIZACIÓN**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y MEDIO AMBIENTE**

#### **AUTORIZACIÓN**

Yo, **MOLINA CUASAPAZ GUILLERMO PAUL**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO GUAYLLABAMBA MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, 03 de febrero de 2016**



-----  
GUILLERMO PAUL MOLINA CUASAPAZ

C.C 1722547260

## DEDICATORIA

La realidad más allá de los nombres no es habitable, y la realidad de los nombres es un perpetuo desmoronamiento, el sentido no está en el texto, sino fuera, estas palabras que escribo andan en busca de su sentido, y en esto consiste todo su sentido. OP.

Dedico mi proyecto, pues bueno.....

*A vos*

*A ti*

*A usted*

A todos quienes encuentren en este, mi proyecto de grado.....

Algún dato, falta ortográfica.....

ó quien sabe, un corazón.....

Y con algo de fortuna.....

Una inspiración o algún conocimiento....

## AGRADECIMIENTO

Los mapas del alma no tienen fronteras.....

Sin lugar a duda existen personas a quien debo todo lo que soy, y cuando digo “todo lo que soy” realmente es una pequeña parte de lo que espero ser. Esperanza que se alberga en mí, gracias a esas mismas personas. Mis padres.

Y los mapas del tiempo tampoco las tienen.....

Enumerar a todos aquellos quienes han influenciado en mí de alguna manera, de distintas formas, y en diversas circunstancias, buenos y malos momentos, lapsos de tiempo cortos y largos, en la misma ciudad, en la misma casa o a miles de kilómetros. Sería casi como escribir otra tesis. Es por eso que pido a cada una de esas personas que cuando lean estas palabras, sepan que fueron escritas pensadas en ellas, y simplemente sonrían y sientan un abrazote de agradecimiento.

Ojalá podamos mantener viva la certeza de que es posible ser compatriota y contemporáneo de todo aquel que viva animado por la voluntad de justicia y la voluntad de belleza, nazca donde nazca y viva cuando viva, porque no tienen fronteras los mapas del alma ni del tiempo.....

## ÍNDICE

CARÁTULA	
CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
CAPÍTULO 1 .....	1
GENERALIDADES	
1.1    Introducción .....	1
1.2    Antecedentes.....	2
1.3    Definición del problema .....	4
1.4    Justificación e importancia.....	5
1.5    Ubicación geográfica del área de estudio .....	6
1.6    Objetivos.....	7
1.6.1    Objetivo General .....	7
1.6.2    Objetivos Específicos .....	7
1.7    Metas.....	8
CAPÍTULO II.....	9
MARCO TEÓRICO	
2.1    Balance hidrológico .....	9
2.1.1    Definición .....	9
2.1.2    Ecuación general del balance hidrológico .....	9
2.1.3    Parámetros que intervienen en el balance hidrológico .....	11
2.2    Balance oferta-demanda hídrica.....	14

2.2.1	Demanda hídrica .....	14
2.2.2	Oferta hídrica .....	15
2.3	Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	16
2.3.1	Generalidades .....	16
2.3.2	Sistemas de Información Geográfica en la hidrología .....	16
2.3.3	Bases de datos geográficas .....	17
CAPÍTULO III	.....	19
METODOLOGÍA		
3.1	Recopilación de información .....	19
3.1.1	Información cartográfica .....	19
3.1.2	Información hidrometeorológica .....	20
3.2	Análisis previo de datos hidrometeorológicos .....	23
3.2.1	Análisis de Confiabilidad e Intervalo de Tiempo .....	23
3.2.2	Definición de períodos de cálculo para la modelación .....	27
3.3	Delimitación hidrográfica del área de estudio .....	33
3.4	Ecuación del balance hídrico .....	37
3.5	Escala de trabajo y tamaño del pixel .....	41
3.6	Modelo digital de elevación .....	42
3.7	Cálculo de parámetros que intervienen en el balance hidrológico .....	43
3.7.1	Precipitación .....	43
3.7.2	Evapotranspiración .....	46
3.7.3	Infiltración .....	52
3.8	Cálculo del caudal de escorrentía .....	54
3.9	Calibración del modelo .....	56
CAPÍTULO IV	.....	59
RESULTADOS		
4.1	Análisis del modelo obtenido .....	59
4.2	Validación del modelo .....	64
4.2.1	Validación con datos reales .....	64
4.2.2	Comparación con otros modelos .....	69
CAPÍTULO V	.....	73



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1. Conclusiones.....	73
5.2 Recomendaciones.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS.....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores medios anuales a nivel mundial .....	10
Tabla 2 Información recopilada en diferentes instituciones .....	19
Tabla 3 Características estaciones Meteorológicas.....	20
Tabla 4 Características estaciones hidrológicas .....	22
Tabla 5 Datos para el coeficiente de correlación entre estaciones M003 y M024.....	25
Tabla 6 Unidades hidrográficas de la Subcuenca del Río Guayllabamba ...	36
Tabla 7 Kc de las estaciones meteorológicas de acuerdo a la cobertura vegetal .....	51
Tabla 8 Caudal en el punto de salida de cada unidad hidrográfica.....	62
Tabla 9 Estaciones Hidrológicas Utilizadas en la Validación .....	65
Tabla 10 Valores medios multianuales para la época lluviosa y para la seca .....	66
Tabla 11 Resultados de la validación .....	68
Tabla 12 Valores Mensuales de Q medio del Modelo elaborado por la UICN .....	71
Tabla 13 Resultados de comparación.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Zona de estudio .....	7
Figura 2 Distribución de las estaciones hidrometeorológicas .....	23
Figura 3 Diagrama de dispersión M003 vs M024.....	26
Figura 4 Curva de doble masa M024 vs M003 .....	26
Figura 5 Variación estacional de la precipitación media mensual.....	28
Figura 6. Precipitación de la estación M003 en el periodo de tiempo (1978-2010).....	30
Figura 7 División nivel.....	34
Figura 8 División nivel 2.....	34
Figura 9 División nivel 3.....	35
Figura 10 División nivel 4.....	35
Figura 11 División nivel 5.....	36
Figura 12 Representación gráfica del balance hídrico .....	37
Figura 13 Esquema General de la Metodología.....	39
Figura 14 Modelo Cartográfico de la Oferta Hídrica en la Subcuenca del Río Guayllabamba.....	40
Figura 15 Modelo digital de elevación del área de estudio .....	43
Figura 16 Flujograma para determinar el mejor método de interpolación....	45
Figura 17 Proceso de obtención de la evapotranspiración. ....	50
Figura 18 Cálculo de la evapotranspiración del cultivo .....	51
Figura 19 Proceso para el cálculo de la infiltración.....	54
Figura 20 Proceso para la determinación del modelo de agua neto .....	56
Figura 21 Diagrama de procesos para la calibración del modelo .....	58
Figura 22 Modelo de oferta hídrica .....	59

Figura 23 Visualización de datos en el modelo de oferta hídrica.....	60
Figura 24 Representación del modelo para la época seca .....	61
Figura 25 Representación del modelo para la época lluviosa.....	61
Figura 26 Puntos de salida de las unidades hidrográficas.....	63
Figura 27 Estaciones utilizadas para la valoración .....	66
Figura 28 Estaciones utilizadas para la valoración modelo UICN.....	70

## RESUMEN

El conocimiento de la disponibilidad de agua que existe en un determinado lugar es de gran importancia para la gestión sustentable y participativa del patrimonio hídrico. Su estimación y variabilidad puede obtenerse por medio de múltiples observaciones in situ o por medio de modelos hidrológicos calibrados. El modelo que se presenta en este estudio determina los caudales medios mensuales para dos épocas del año en la subcuenca del Río Guayllabamba, y parte del concepto que el caudal de escorrentía, básicamente se puede modelar utilizando tres variables macro, la precipitación, la infiltración del suelo y la evapotranspiración. Para posteriormente calibrarlo con datos de escorrentía observados. De esta manera se pretende una aproximación lo más cercana a la realidad. De acuerdo a los resultados del modelo, la subcuenca del río Guayllabamba presenta de forma global una oferta hídrica media anual de 131,63 m<sup>3</sup>/s. Siendo la época lluviosa la que mayor caudal de escorrentía aporta al promedio anual. De las unidades hidrográficas que conforman la subcuenca del río Guayllabamba las que presentan mayor caudal de salida son Guayllabamba Bajo, Quebrada de San Andrés y Guayllabamba Medio. Se concluye de forma general que los datos que se obtienen del modelo, permiten conocer un caudal bastante aproximado a la realidad de los cauces de la subcuenca, de acuerdo a los resultados del proceso de validación del modelo, realizado a partir de datos históricos de caudales de escorrentía observados.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **BALANCE HÍDRICO**
- **OFERTA HÍDRICA**
- **GESTIÓN TERRITORIAL**
- **MODELAMIENTO**

## **ABSTRACT**

The knowledge about the water availability of a specific place is considered like an important factor to get sustainable and participatory management of the hydrological patrimony. The variability of this value could be determinate by multiple measurements or by hydrological models. The model that was developed in this survey determinates the average monthly flow rates of two seasons in the year for the basin of the Guayllabamba River, and it was generated following the concept that establish that the flow rates could be model using basically three variables, the precipitation, evapotranspiration, and soil infiltration. Then it was calibrated with information of historical flow rates measurements. In this way the model tries to reach an approximation to the reality. According to the results of the model, the basin of the Guayllabamba River has an annual average of flow rate of 131,63 m<sup>3</sup>/s. Being the rainy season which provide the majority part of flow rate in the year. Of the nine hydrological units that are in the Guayllabamba River basin, the three ones with more flow rates are the GuayllabambaBajo, Quebrada de San Andrés and Guayllabamba Medio. It concludes in a general way that the values obtained by the model are useful to know an approximate flow rate of the basin, because of the good results of the validate process.

### **KEY WORDS:**

- **HYDROLOGICAL BALANCE**
- **WATER SUPPLY**
- **TERRITORIAL MANAGEMENT**
- **MODELING**

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

El agua es un compuesto vital, el cual se constituye como el más abundante sobre la tierra, de gran importancia para el ser humano y en general de todo el planeta. El agua cubre el 71 % de la superficie de la corteza terrestre, se localiza principalmente en los océanos, donde se concentra el 96,5 %, en los glaciares y casquetes polares existe el 1,74 %, los depósitos subterráneos, los permafrost y los glaciares continentales almacenan el 1,72 % y el restante 0,04 % se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos. Sin este compuesto no existiría la vida en la tierra(Springall, 1970).

El agua es una molécula formada por dos elementos, hidrógeno y oxígeno, la temperatura y la presión atmosférica determinan los tres diferentes estados del agua, sólido, líquido y gaseoso. A temperatura ambiente el agua es líquida, a los 0° C se produce la congelación, y a una temperatura de 100° C, el líquido se transforma en vapor. Así mismo el agua posee varias propiedades físico químicas, entre las más importantes se tiene que la densidad del agua es muy estable. A la presión normal, el agua líquida tiene una mínima densidad (0,958 kg/l) a los 100 °C, al bajar la temperatura, aumenta la densidad hasta llegar a los 3,8 °C donde alcanza una densidad de 1 kg/litro. El agua pura tiene una conductividad eléctrica relativamente baja, pero ese valor se incrementa significativamente con la disolución de una pequeña cantidad de material iónico, como el cloruro de sodio (Fundación Gonzalo Río Arronte, 2004).

Estudios realizados por la FAO predicen que para el año 2030 uno de cada cinco países en vías de desarrollo tendrán problema de escasez de agua, en la actualidad ya existen regiones que presentan problemas para solventar las necesidades diarias de la población, debido en gran parte a la

explosión demográfica mundial, es por eso que las fuentes de agua se han visto disminuidas y contaminadas, un problema que día a día se agudiza.

Para lograr una adecuada gestión del agua en el territorio, se debe incluir dentro de los planes de desarrollo, la protección del recurso hídrico, para lo cual se necesita enfocarse en el aprovechamiento integrado del agua y a demás considerar la administración y operación de los diferentes sistemas existentes de distribución de este recurso. En este amplio contexto, el conocimiento de la disponibilidad hídrica debe priorizarse. La oferta hídrica se encuentra vinculada a la disponibilidad de agua que existe en las diferentes unidades hidrográficas.

Es así que este estudio busca estimar la disponibilidad hídrica en la subcuenca del río Guayllabamba mediante modelación hidrológica a través del uso de herramientas geoinformáticas. Dicho modelo es una herramienta que permite calcular los caudales medios mensuales a lo largo de la subcuenca del río Guayllabamba y se basa en la información hidrometeorológica disponible, así como en la morfología del terreno, la capacidad de infiltración, el uso y la cobertura del suelo. Con lo que se pretende una aproximación lo más cercana a la realidad.

## **1.2 Antecedentes**

El Art. 3 del Decreto Ejecutivo 1088, del 15 de mayo de 2008, estipula: “La Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) tiene la facultad de conducir los procesos de gestión de los recursos hídricos de una manera integral y sustentable en los ámbitos de cuencas, subcuencas, microcuencas o demarcaciones hidrográficas e hidrogeológicas de acuerdo con la LORHUA, su reglamento y demás normas conexas vigentes relacionadas con los recursos hídricos superficiales y los acuíferos en el Ecuador”.

Con el fin de cumplir con las disposiciones de la Constitución de la República del Ecuador, lograr los objetivos y realizar las políticas del Plan Nacional Para el Buen Vivir (2013–2017), El Plan Nacional de Desarrollo (2007-2010), se plantea este proyecto como una metodología para estimar



la oferta hídrica de cuencas hidrográficas y de esta manera conseguir cumplir con los objetivos antes mencionados.

La oferta hídrica natural está directamente asociada a la disponibilidad de agua que el ciclo hidrológico provee en un período y lugar dados. Su estimación y variabilidad puede obtenerse por medio de múltiples observaciones in situ o por medio de modelos hidrológicos calibrados (INFOAGUA, 2014). Varios de estos modelos han sido generados para cuencas hidrográficas del Ecuador, por ejemplo en Pérez(2007), se estimó la oferta hídrica de la cuenca alta del río Pita, donde se utilizaron todas las variables propuestas por Coello(2007) en el esquema de balance hídrico.

Existen modelos como el propuesto por De bievre & Coello(2008) el cual permite la estimación de los caudales naturales medios y con un 80 % de excedencia en el tiempo, con el objeto de cuantificar la oferta natural (producción natural de agua) en cualquier punto de la red hidrográfica de la Hoya de Quito. En el 2012, esta caracterización se extendió a las microcuencas de Papallacta y Antisana, considerando el efecto de la probable variabilidad de la precipitación en el futuro próximo con casos de incremento y de decremento. Esta misma metodología se automatiza y se la pone a disponibilidad de cualquier usuario en una plataforma virtual, donde como resultado se obtiene la distribución espacial de la disponibilidad natural (oferta) de agua presente y futura, que en conjunto con información adicional de cobertura y uso de suelo, usos del agua y la densidad poblacional, sirven de insumo para el cálculo y representación espacial de la disponibilidad neta del recurso hídrico (oferta – demanda).

El presente estudio propone una metodología alternativa que tiene como base el modelo propuesto por Pérez(2007). Con varias modificaciones en las variables a considerar y principalmente en la forma de calibrar el modelo, además de contar con los resultados suficientes para realizar una comparación con los estudios más actuales.

### 1.3 Definición del problema

Si bien es cierto, el ciclo hidrológico mantiene una determinada cantidad de agua constante en el tiempo, distribuida en los diferentes procesos, el problema radica en la disponibilidad de agua en condiciones aceptables para los diferentes usos y para el número de individuos que se la utiliza. En este contexto se hace referencia al incremento en la población mundial, la cual ha pasado de 2630 millones en 1950 a 7349 millones en 2015. Y aún más en la población urbana de 733 millones a 3505 millones (ONU, 2015).

Es por eso, que la disponibilidad del agua resulta problemática alrededor del mundo, se estima que aproximadamente mil millones de personas tienen un deficiente acceso al agua potable. Es así que a nivel mundial se han establecido datos y estadísticas que demuestran este fenómeno, por ejemplo un estudio realizado por la Subdirección General de Administración de Agua de México afirma que ese país ha perdido 75.52% de la disponibilidad media per cápita de agua en los últimos 56 años. Pasando de 18,035m<sup>3</sup>/hab/año en 1950 a tan solo 4,416 en el 2006. Situación que se puede extrapolar para la mayoría de ciudades en procesos de urbanización constantes.

Una de las causas de la disminución considerable de volumen de agua superficial y subterránea ha sido la creciente demanda de agua provocada por las actividades industriales, urbanas y agrícolas (Votano, Parham, & Hall, 2004). Siendo el agua destinada para riego agrícola la causa primordial de la disminución del volumen de este recurso, debido a la creciente demanda de alimentos para satisfacer a una población en constante crecimiento.

Esta reducción de la disponibilidad hídrica genera conflictos, que tienden a multiplicarse y agravarse; si no se toman las medidas necesarias, como la regulación del uso del agua a través de mecanismos de planificación, normativas y leyes que permitan su protección y su distribución en forma racional (Ordoñez, 2011).

En el Ecuador uno de los principales obstáculos para alcanzar una gestión integrada de los recursos hídricos es la falta de información sobre la disponibilidad, utilización y desperdicio del agua en general, que no permite adoptar de manera adecuada y razonable las decisiones acertadas para la asignación del agua, la planificación de sus usos y el ordenamiento de la utilización del territorio(CEPAL, 2012), así como tampoco posibilita un buen desempeño de las funciones de vigilancia, control y regulación. En el caso particular de la subcuenca del río Guayllabamba existen el suficiente número de estaciones hidrológicas y meteorológicas para la generación, calibración y validación de un modelo cartográfico del cual se puede obtener la oferta hídrica de cualquier punto de la subcuenca.

#### **1.4 Justificación e importancia**

El proyecto se encuentra alineado con el objetivo 7 del Plan Nacional del Buen Vivir, el cual busca garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global, por medio de la política 7.6 que establece que se debe gestionar de manera sustentable y participativa el patrimonio hídrico, con enfoque de cuencas y caudales ecológicos para asegurar el derecho humano al agua(SENPLADES, 2014).

Uno de los pilares fundamentales para lograr esta política es el determinar el estado actual de la oferta y disponibilidad del recurso hídrico, así como la presión por la demanda del mismo, teniendo en cuenta la distribución espacial y temporal, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, y que sirva de base a los usuarios del recurso y planificadores, para considerar su uso y disponibilidad en proyectos actuales y futuros.

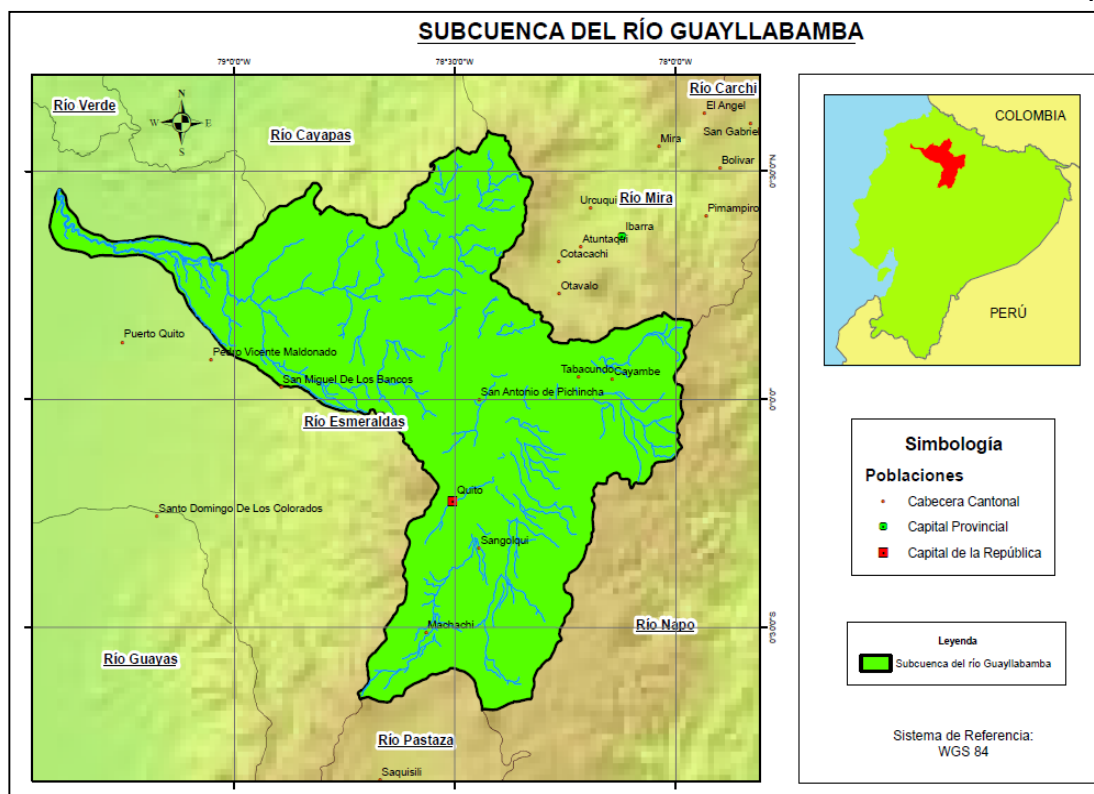
En este sentido los sistemas de información geográfica (SIG) tienen un papel fundamental debido a que con el uso de diversas herramientas geoinformáticas se logra integrar mucha información, extraer parámetros necesarios para la modelación hidrológica y enlazar esta información con los modelos digitales de elevación (MDE). Con la finalidad de recuperar salidas

de los modelos generados y presentarlas en el mismo ambiente SIG(Pusinerí, Pedraza, & Lozeco, 2010).

Es así que este estudio busca estimar la disponibilidad hídrica en la subcuenca del río Guayllabamba mediante modelación hidrológica a través del uso de herramientas geoinformáticas. Dicho modelo es una herramienta que permite calcular los caudales medios mensuales a lo largo de la subcuenca del río Guayllabamba y se basa en la información hidrometeorológica disponible, así como en la morfología del terreno, la capacidad de infiltración, el uso y la cobertura del suelo. Con lo que se pretende una aproximación a la realidad y de esta manera conocer la disponibilidad de agua para poder generar políticas o proyectos en pro de su conservación y óptimo manejo.

### **1.5 Ubicación geográfica del área de estudio**

La subcuenca del río Guayllabamba es parte integral de la demarcación hidrográfica del río Esmeraldas, tiene una superficie de 8.200 km<sup>2</sup>, está ubicada en la región interandina norte del Ecuador, y está formada por ocho cantones: Cayambe, Cotacachi, Distrito Metropolitano de Quito, Mejía, Pedro Moncayo, Pedro Vicente Maldonado, Otavalo y Rumiñahui, todos pertenecientes a las provincias de Pichincha e Imbabura. A continuación se muestra la zona de estudio en la **Figura 1 Zona de estudi**



**Figura 1 Zona de estudio**

## 1.6 Objetivos

### 1.6.1 Objetivo General

Estimar la disponibilidad hídrica en la subcuenca del río Guayllabamba mediante modelación hidrológica a través del uso de herramientas geoinformáticas.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

- Realizar el proceso de homogenización de los datos meteorológicos e hidrológicos disponibles de la subcuenca del río Guayllabamba.
- Generar el modelo de balance hidrológico a partir de la información geográfica, meteorológica e hidrológica; mediante el empleo de un sistema de información geográfica (SIG).
- Calibrar el modelo hidrológico obtenido con el fin de adaptarlo de mejor manera a la realidad.

- Validar el modelo hidrológico propuesto, en función de datos reales de estaciones hidrológicas medidos en la zona de estudio.
- Generar la geodatabase donde se presente el modelo hidrológico que permita la estimación de la oferta hídrica en cualquier punto de la subcuenca del río Guayllabamba.

### **1.7 Metas**

- Presentar un listado de datos meteorológicos e hidrológicos homogenizados disponibles de la subcuenca del río Guayllabamba.
- Obtener un modelo de balance hidrológico a partir de la información geográfica, meteorológica e hidrológica.
- Ofrecer una geodatabase con el modelo hidrológico propuesto, para su utilización.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Balance hidrológico

##### 2.1.1 Definición

El balance hidrológico se define como el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado (PNUMA, 2010). Otros autores lo definen como la disponibilidad de agua que se establece para un lugar y un período dados; lo cual se realiza mediante una comparación entre los aportes y las pérdidas de agua en ese lugar y para ese período (Pérez, 2007). Se tienen en cuenta también factores adicionales como la constitución de las zonas de estudio y las extracciones sobre esas reservas.

##### 2.1.2 Ecuación general del balance hidrológico

La ecuación de balance hidrológico o continuidad, es considerada la ley más importante en hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada. Principalmente por la falta de medidas directas, las variaciones de la evapotranspiración, las pérdidas profundas y la cantidad de agua que es almacenada en cada cuenca (Llorens, 2003). De manera general la ecuación global del balance hídrico se presenta en la Ecuación 1 (Konstatinov, 1987).

$$Z_m + Z_s = X_m + X_s \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde  $Z_m$  y  $Z_s$  corresponden a los valores de la evaporación en los mares y en la superficie, mientras que  $X_m$  y  $X_s$  representan la precipitación en los mares y en la superficie. A partir de esta ecuación se determinan variaciones para la obtención del balance hidrológico en diferentes zonas. Es así que el balance hidrológico en la superficie se encuentra definido por la Ecuación 2 (Konstatinov, 1987).

$$Xs = Zs + Yc$$

Ecuación 2

En donde  $Xs$  corresponde al valor de la precipitación en la superficie,  $Zs$  es la evaporación en la superficie y  $Yc$  se la denomina como la escorrentía superficial. Se puede afirmar que esta ecuación consiste en una cuantificación de las entradas y salidas de agua y que la diferencia entre los ingresos y los egresos dan origen a la escorrentía superficial.

Para tener la idea general del comportamiento de estos factores a nivel mundial se exponen los valores medios anuales de precipitación, evaporación y escorrentía superficial para distintas superficies en la **Error! Reference source not found.**

**Tabla 1**  
**Valores medios anuales a nivel mundial**

Nombre de la superficie	Área (millones de Km <sup>3</sup> )	Precipitación		Evaporación		Escorrentía S.	
		Volumen (miles Km <sup>3</sup> )	Media anual (MM)	Volumen (miles Km <sup>3</sup> )	Media anual (MM)	Volumen (miles Km <sup>3</sup> )	Media anual (MM)
Océanos y mares	361	412	1144	448	1240	-	-
Seca con salida al océano	117	99	850	63	540	36	310
Seca	32	8	250	8	250	-	-
Total	510	519	1020	519	1020	36	310

Fuente: (Konstatinov, 1987)

De acuerdo a la tabla se puede apreciar que la mayor parte del agua del planeta está contenida en los océanos y mares. Y existe un balance natural entre la precipitación y la evaporación a nivel global.



### **2.1.3 Parámetros que intervienen en el balance hidrológico**

#### **2.1.3.1 PRECIPITACIÓN**

La precipitación constituye la principal entrada de agua dentro del ciclo hidrológico, que es la circulación del agua en la tierra, conformado por los lugares de almacenamiento y los procesos que permiten el flujo de agua entre ellos. La precipitación varía tanto espacial como temporalmente en una cuenca, es denominada como el agua que cae en una zona determinada, y puede ocurrir como lluvia, neblina, nieve, rocío, etc. La medición de la lluvia se realiza en las estaciones meteorológicas a través de instrumentos llamados pluviómetros y es uno de los datos indispensables para el balance, que con mayor frecuencia se encuentra disponible (Ordoñez, 2011).

A la precipitación se la denomina también como el producto de la condensación atmosférica, y ocurre debido a la saturación de la atmósfera por aumento del vapor de agua, o por enfriamiento, consideradas como las dos causas de la precipitación (Benhamrouche & Martín, 2012).

#### **2.1.3.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN**

El término de evapotranspiración se utiliza para englobar tanto el proceso físico de pérdida de agua por evaporación como el proceso de transpiración, que se refiere al agua que es absorbida por las plantas (FAO, 2000). La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante.

La energía requerida para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor proviene de la radiación solar directa y, en menor grado, de la temperatura ambiente del aire. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y este proceso se ralentiza hasta detenerse completamente, si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera. Este empieza a depender de la velocidad del viento. Por lo tanto,

la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación(FAO, 2000).

En los casos que la superficie evaporante sea la superficie propia del suelo, tanto la cantidad de agua disponible en el ambiente, así como el grado de cobertura del suelo, se convierten en factores importantes que afectan el proceso de evaporación. Varios fenómenos físicos como lluvias constantes, sistemas de riego y el ascenso capilar de un suelo con un manto freático poco profundo, mantienen dicha humedad en el ambiente. En estas condiciones el suelo es capaz de proveer la demanda de evaporación del suelo y el proceso solo se determina por las condiciones meteorológicas. Por otra parte en zonas en las que no existe la suficiente disponibilidad de agua ya sea por poca precipitación, intervalos de riego muy grandes o que la capacidad del suelo de conducir la humedad sea mínima(FAO, 2000).

La evaporación se ve reducida casi a su totalidad en lapsos cortos de tiempo(FAO, 2000). Es por eso que se puede decir que en superficies secas la evaporación es un 50 % más alto que en zonas que presentan distintos grados de humedad, de igual manera la velocidad de evaporación es mayor, y depende de la cantidad de viento que exista, a mayor viento mayor será la velocidad de evaporación.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende de muchos factores como la radiación, la temperatura, la humedad atmosférica, el viento, el contenido de agua del sustrato, la capacidad de conducir el agua a las raíces, la salinidad del suelo y el estado de

desarrollo del cultivo, factores que deben ser considerados al evaluar la transpiración (FAO, 2000).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Debido a esto para la determinación de esta variable han surgido dos conceptos. La evapotranspiración potencial (ETP) que se refiere a la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, cuando toda la superficie está saturada de agua, de manera que no haya ninguna restricción de humedad. Y la evapotranspiración real (ET<sub>real</sub>) que es la cantidad de agua, expresada en mm por unidad de tiempo, que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal (Valdivieso, 2011).

### **2.1.3.3 INFILTRACIÓN**

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos (Pérez, 2007).

La cantidad de agua proveniente de la precipitación que se infiltra será gobernada por la intensidad de la lluvia en relación con la tasa de infiltración del suelo. La tasa a la cual se infiltra el agua de lluvia en el suelo está influenciada por varios factores como la abundancia, la estabilidad y tamaño de los poros en la superficie, relacionadas al tipo de suelo; las actividades antropológicas que se realicen y la presencia o no de materia orgánica en el suelo. Cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la tasa de infiltración, tendrá lugar la escorrentía (FAO, 2005).

La infiltración, como un componente del ciclo hidrológico, está relacionada con el escurrimiento superficial, con la recarga de los acuíferos y la vulnerabilidad del recurso a la contaminación (Landini, Martínez, Hugo, & Soza, 2007).

#### **2.1.3.4 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL**

Es el volumen de agua proveniente de la lluvia que hace su recorrido sin infiltrarse, desde el lugar donde cae, hasta una corriente de agua. La escorrentía comprende el exceso de la precipitación que se almacena después de una lluvia y que se desplaza libremente por la superficie del terreno, todo éste flujo contribuye para alimentar y aumentar el caudal que circula por las corrientes principales de agua. La corriente de agua puede ser alimentada tanto por el exceso de precipitación como por las aguas subsuperficiales y subterráneas (Pérez, 2007).

De igual manera el escurrimiento superficial se encuentra ligado a la cobertura del suelo. Por ejemplo, en un suelo cubierto de pasto se asume que tiene un escurrimiento, una infiltración y una evapotranspiración relativamente bajos. Lo que produce caudales de carácter regular en largos periodos de tiempo. En el caso de tener una zona cubierta por árboles, se tendrá mayor evapotranspiración, el escurrimiento se verá frenado por arboles y existirá mayor infiltración, lo que provocará caudales bajos pero regularizados. En el caso de una zona urbana donde la evapotranspiración es mínima y la infiltración prácticamente nula, se evidencia importantes escurrimientos muy irregulares y crecidas bruscas (Serrano, 2011).

### **2.2 Balance oferta-demanda hídrica**

El balance entre la oferta y la demanda se define como la diferencia entre la oferta natural y la demanda neta, es decir el caudal natural aprovechable y el requerido. El resultado que se obtiene de esta relación es el caudal neto disponible, lo cual permite la identificación de zonas de estrés hídrico, convirtiéndolo en una importante herramienta de gestión territorial (INFOAGUA, 2014).

#### **2.2.1 Demanda hídrica**

La demanda hídrica se define como el volumen de agua que se requiere en las diversas actividades antrópicas, entre las cuales se encuentra el

abastecimiento de agua potable para la población, el agua necesaria para los procesos industriales y el agua corriente para la generación de energía eléctrica y los sistemas de riego pertenecientes al sector agropecuario. Siendo este último junto al agua potable los usos considerados como críticos (Sabas, 2009).

En estudios realizados en el país sobre la demanda hídrica los cálculos se realizan con base en las captaciones de agua existentes que representan los usos actuales de agua y los flujos de retorno asociados a cada uso de agua. El caudal de retorno es la parte del consumo que vuelve a la red hidrográfica de la cuenca de manera directa o indirecta. En otras palabras es el caudal que no se consume de manera real y que tampoco se evapora o transpira (INFOAGUA, 2014).

En la cuantificación de la demanda se deben integrar la mayor parte de las actividades que requieren del recurso hídrico, para de esta manera poder modelar el comportamiento y su distribución en el tiempo, para planificar su uso sostenible (Serrano, 2011).

### **2.2.2 Oferta hídrica**

La oferta hídrica de una cuenca corresponde al volumen disponible de agua, es decir que es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del suelo, se encuentra disponible. Escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar (Ordoñez, 2011).

Constituye uno de los principales productos que se utilizan para la planificación y gestión integrada, debido a que es el insumo principal para la determinación del estrés hídrico, índice construido especialmente para estimar si los requerimientos hídricos en un sector de uso determinado pueden ser o no satisfechos, y en qué medida (INFOAGUA, 2014).

## **2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), constituyen una herramienta informática que utiliza la tecnología de procesamiento de información asistido por computadora para la entrada, manipulación y despliegue de datos espaciales. Utilizado por operadores que manipulan las bases de datos espaciales y constituyen un puente de soporte entre la realidad y el usuario (Zafirir, 2015).

El SIG es un modelo compuesto de un conjunto de objetos, datos espaciales, donde se realizan procesos y consultas. Este conjunto de objetos o bloques constituyen procedimientos cuya función en forma de algoritmos abstractos, permite actualizar y procesar elementos de una base de datos espaciales (SINPAD, 2014).

### **2.3.1 Generalidades**

El uso de SIG se encuentra relacionado a la visualización de los datos obtenidos en un mapa o representados en un modelo con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo. Además, permiten realizar las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, conformándose como un valioso apoyo en la toma de decisiones (CEA, 2014).

### **2.3.2 Sistemas de Información Geográfica en la hidrología**

El SIG ofrece la capacidad de almacenar, acceder, analizar, manipular, desplegar e integrar información ambiental, económica y social en un solo sistema, es así que al relacionarlo con la hidrología se los utilizar para la obtención de diversos resultados como Modelos Digitales del Terreno (MDT), llevar a cabo la delimitación y caracterización de cuencas, estudiar y analizar la distribución espacial de los recursos hídricos o evaluar la pérdida de suelo mediante modelos de erosión. Esta información es imprescindible a

la hora de gestionar los recursos ya que su análisis es clave en la toma de decisiones en proyectos de desarrollo socioeconómico y ambiental.

Las herramientas de interpolación que presentan en los SIG permiten analizar la distribución espacial de variables partiendo de datos puntuales, muy útil para conocer por ejemplo la distribución espacial de las precipitaciones. La caracterización de cuencas hidrográficas, así como el análisis de los componentes físicos de una superficie, la identificación de sumideros, el cálculo de la dirección del flujo y la acumulación, o la creación de redes de corrientes, representan aspectos que resultan de gran interés cuando hablamos de gestión hidrológica y se pueden realizar mediante SIG.

Con todas estas características podemos afirmar que los SIG son una tecnología fundamental para la gestión hidrológica, ya que facilitan la realización de cálculos que hasta hace años se llevaban a cabo manualmente, lo que suponía una mayor inversión en tiempo y en muchas ocasiones, una menor precisión en los resultados (Benayas, 2014).

### **2.3.3 Bases de datos geográficas**

Una Base de Datos Geográfica (BDG) es un conjunto de datos geográficos organizados de tal manera que permiten la realización de análisis y la gestión del territorio dentro de aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, una BDG se utiliza de soporte para la implantación de servicios geográficos relacionados con las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE), y su contenido es la base fundamental en los procesos de producción cartográficos (Zafrir, 2015).

La estructura fundamental de una BDG es el modelo de datos, que consiste en la formalización conceptual de las entidades geográficas del mundo real con el objeto de realizar una abstracción que permita satisfacer unas necesidades de información (IGN, 2015).

#### **2.3.3.1 Modelo de datos espaciales**

La base de datos espacial está conformada por datos referenciados en el espacio que actúa como un modelo de la realidad (NCGIA, 1990). Para

realizar un modelo en un SIG es necesario en primer lugar introducir la información geográfica y realizar procesos que traten de simular las condiciones de la realidad, siendo los modelos de datos más empleados el vectorial y el raster.

Si se desea disponer de información de una amplia zona sin importar los límites de los objetos, se emplean los datos raster con los que se dispone de información continua. Sin embargo, si los límites de las entidades geográficas tienen gran importancia para la aplicación y se requieren recoger los elementos de forma individual, se elegirá un modelo vectorial (Zafrir, 2015).

El modelo raster centra su interés más en las propiedades del espacio que en la representación precisa de los elementos que lo conforman. Para ello estructura en el espacio en una serie de elementos discretos por medio de una retícula regular, generalmente compuesta por píxeles.

La representación de los elementos del mundo real se hace de la siguiente forma: un elemento puntual se representa mediante una celda un elemento lineal mediante una secuencia de celdas alineadas y un elemento poligonal mediante una agrupación de celdas contiguas. Los límites entre los elementos geográficos no quedan registrados de forma explícita, pero se pueden deducir a partir de los valores de las celdas. Por ejemplo: un lago puede representarse mediante un grupo de celdas colindantes que tienen un mismo valor temático; se trata por tanto, de un modelo continuo que cubre todo el territorio (Zafrir, 2015).

La principal función de los modelos raster es que permiten representar variables continuas. El ejemplo más típico es el mapa de altitudes, donde se le asigna a cada celda un valor, de forma que se puede conocer como varía la altitud por toda el área que cubre un mapa. Se puede representar de esta forma superficies tridimensionales, que añade una tercera variable (Z) a las dos coordenadas de cada localización (X e Y), para representar el valor de la variable cuantitativa y continua, en este caso la altitud; esto es lo que se conoce como modelo digital de elevaciones (Zarzosa & Núñez, 2002).



## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 Recopilación de información

##### 3.1.1 Información cartográfica

Para el presente estudio se utilizó información referente a demarcaciones y unidades hidrográficas a nivel nacional escala 1:25.000, y al factor de infiltración del suelo escala 1:100.000, ambas proporcionadas por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA). Así mismo se requirió información del relieve del terreno y datos de elevación, para lo cual se utilizó el Modelo Digital del Terreno (MDT), obtenido mediante campañas realizadas por el programa SIGTIERRAS entre los años 2010 – 2014. La información acerca de la cobertura y uso de la tierra fue proporcionada por El Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), que a través de la Unidad Ejecutora MAGAP-PRAT, generó cartografía temática a escala 1:25.000 publicada en el 2015.

La información cartográfica fue entregada en el sistema de referencia WGS84 y la proyección UTM 17 Sur. En la Tabla 2 se muestra un resumen de la información, fuente y escala de trabajo. Para el desarrollo del estudio, así como para el tratamiento de la información se utilizó el software ArcGIS versión 10.0.

**Tabla 2**  
**Información recopilada en diferentes instituciones**

INFORMACIÓN	FUENTE
Coberturas de demarcaciones y unidades hidrográficas, escala 1:25 000	Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)
Cobertura de uso y ocupación del suelo, escala 1: 25000	Ministerio de agricultura, acuacultura, ganadería y pesca. (MAGAP-SIGTIERRAS)
Modelo Digital del Terreno (MDT), tamaño pixel de 3m.	SIGTIERRAS

Continúa 

### 3.1.2 Información hidrometeorológica

La información hidrometeorológica se recopiló de las bases de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INHAMI) y de SENAGUA. Se toma en cuenta tanto estaciones meteorológicas como hidrológicas, las cuales incluyen series de tiempo de alrededor de 30 años.

Se recopiló datos históricos de 35 estaciones meteorológicas, de las cuales 29 se utilizaron para obtener datos de precipitación, 6 exclusivamente para el cálculo de la evapotranspiración, en el cual intervienen datos de temperatura, nubosidad, velocidad del viento y humedad relativa y 8 estaciones para obtener las dos variables mencionadas (precipitación y evapotranspiración). Así mismo se utilizó valores históricos de caudal de escorrentía de 9 estaciones hidrológicas para la calibración y validación del modelo. Un total de 44 estaciones entre meteorológicas e hidrológicas que se encuentran tanto en el interior como en los alrededores de la subcuenca del río Guayllabamba, localizadas en las provincias de Pichincha, Imbabura y Esmeraldas. Las características de las estaciones meteorológicas se muestran en la Tabla 3 y los registros históricos se muestran en el anexo C.

El INHAMI clasifica las estaciones meteorológicas según su tipo, el cual se encuentra relacionado con la información que cada estación maneja, las estaciones que se utilizaron en el presente estudio son de 5 tipos distintos, Pluviométrica (PV), Agrometeorológica (AP), Climatología Ordinaria (CO), Climatología Principal (CP), y Pluviográfica (PG) (INAMHI, 2010).

**Tabla 3**  
**Características estaciones Meteorológicas**

CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	TIPO	ELEVACIÓN (m)	LONGITUD	LATITUD	PROVINCIA
M364	LORETO PEDREGAL	PV	3620	78G 25' 35" W	0G 33' 41" S	PICHINCHA
M353	RUMIPAMBA-PICHINCHA	PV	2940	78G 24' 57" W	0G 25' 39" S	PICHINCHA
M003	IZOBAMBA	AP	3058	78G 33' 0" W	0G 22' 0" S	PICHINCHA

Continua 

M335	LA CHORRERA	PV	3165	78G 32' 6" W	0G 12' 6" S	PICHINCHA
M114	TUMBACO	CO	2348	78G 24' 50" W	0G 14' 0" S	PICHINCHA
M002	LA TOLA	AP	2480	78G 22' 0" W	0G 13' 46" S	PICHINCHA
M347	PUEMBO	PV	2460	78G 21' 21" W	0G 10' 34" S	PICHINCHA
M024	QUITO INAMHI- INNAQUITO	CP	2789	78G 29' 0" W	0G 10' 0" S	PICHINCHA
M357	CANAL 10 TV.	PV	3780	78G 31' 21" W	0G 9' 53" S	PICHINCHA
M346	YARUQUI INAMHI	PV	2600	78G 18' 55" W	0G 9' 35" S	PICHINCHA
M343	EL QUINCHE-PICHINCHA	PV	2605	78G 18' 12" W	0G 6' 8" S	PICHINCHA
M345	CALDERON	PV	2645	78G 25' 15" W	0G 5' 54" S	PICHINCHA
M361	NONO	PV	2710	78G 34' 22" W	0G 4' 24" S	PICHINCHA
M344	CANGAHUA	PV	3140	78G 10' 2" W	0G 3' 26" S	PICHINCHA
M341	GUAYLLABAMBA	PV	2150	78G 20' 35" W	0G 3' 25" S	PICHINCHA
M115	SAN ANTONIO DE PICHINCHA	CO	2430	78G 26' 13" W	0G 0' 37" S	PICHINCHA
M358	CALACALI INAMHI	PV	2810	78G 30' 45" W	0G 0' 5" N	PICHINCHA
M339	NANEGALITO	PG	1580	78G 40' 35" W	0G 4' 0" N	PICHINCHA
M022	TABACUNDO H.MOJANDA	CO	2955	78G 14' 6" W	0G 3' 11" N	PICHINCHA
M359	CAYAMBE	PV	2840	78G 8' 22" W	0G 3' 14" N	PICHINCHA
M023	OLMEDO-PICHINCHA	CO	3120	78G 2' 52" W	0G 8' 53" N	PICHINCHA
M325	GARCIA MORENO	PV	1950	78G 37' 38" W	0G 14' 5" N	IMBABURA
M326	SELVA ALEGRE- IMBABURA	PV	1800	78G 34' 37" W	0G 14' 47" N	IMBABURA
M318	APUELA-INTAG	PV	1620	78G 30' 49" W	0G 21' 18" N	IMBABURA
M116	CHIRIBOGA	PV	1750	78G 46' 55" W	0G 12' 38" S	PICHINCHA
M120	COTOPAXI-CLIRSEN	CO	3510	78G 34' 53" W	0G 37' 24" S	COTOPAXI
M350	HDA.LA GRANJA-ALOAG	PV	3100	78G 39' 12" W	0G 28' 35" S	PICHINCHA
M025	LA CONCORDIA	CP	379	79G 22' 17" W	0G 1' 36" N	PICHINCHA
M156	QUININDE	CP	115	79G 26' 0" W	0G 19' 10" N	ESMERALDAS
M210	VINDOBONA	CP	2250	78G 24' 6" W	0G 0' 2" N	PICHINCHA
M214	PERUCHO INECEL	CP	1885	78G 25' 19" W	0G 6' 44" N	PICHINCHA
M211	LA VINNA DE CHESPI	CP	1490	78G 32' 0" W	0G 7' 0" N	PICHINCHA
M046	PACHIJAL MASHPI	CP	560	78G 57' 0" W	0G 11' 22" N	PICHINCHA
M213	LA PERLA	CP	1410	78G 40' 10" W	0G 11' 34" N	PICHINCHA
M118	INIAP	CO	2758	78G 30' 0" W	0G 21' 0" S	PICHINCHA

Fuente: (INAMHI, 2010)

Así mismo las estaciones hidrológicas se clasifican en función del tipo de instrumentos que utilizan para calcular el caudal del río. Si la estación cuenta con un limnómetro (escala o mira que registra puntualmente el nivel de río respecto a un nivel de referencia), se denomina estación limnimétrica (LM), si la estación cuenta además de un limnómetro con un limnógrafo (instrumento que registra variaciones de agua en forma continua). Se la denomina estación limnigráfica (LG)(INAMHI, 2010). Las características de las estaciones hidrológicas se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4**  
**Características estaciones hidrológicas**

CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	TIPO	ELEVACIÓN	LONGITUD	LATITUD	PROVINCIA
H158	PITA AJ SALTO	LM	3550	78G 25' 59" W	0G 34' 21" S	PICHINCHA
H159	SAN PEDRO EN MACHACHI	LG	2680	78G 32' 42" W	0G 27' 43" S	PICHINCHA
H144	GUACHALA AJ GRANOBLES	LG	2740	78G 9' 30" W	0G 0' 47" N	PICHINCHA
H145	GUAYLLABAMBA AJ CUBI	LG	1540	78G 25' 40" W	0G 5' 35" N	PICHINCHA
H136	ALAMBI EN CHURUPAMBA	LG	920	78G 40' 50" W	0G 9' 0" N	PICHINCHA
H149	GUAYLLABAMBA EN PTE.CHACAPATA	LM	860	78G 38' 17" W	0G 10' 50" N	IMBABURA
H150	INTAG DJ PAMPLONA	LG	1000	78G 37' 24" W	0G 13' 16" N	PICHINCHA
H146	GUAYLLABAMBA DJ ALAMBI	LM	625	78G 44' 30" W	0G 14' 10" N	IMBABURA
H170	GUAYLLABAMBA A.J. BLANC	LM	90	79G 23' 53" W	0G 26' 31" N	ESMERALDAS

Fuente: (INAMHI, 2010)

En la **Figura 2 Distribución de las estaciones hidrometeorológicas** pertenecientes a la subcuenca del río Guayllabamba. Como se puede ver la distribución de las estaciones es relativamente buena y cubren la mayoría del territorio en estudio. En el anexo A1. Se encuentra el Mapa de distribución de estaciones hidrometeorológicas.

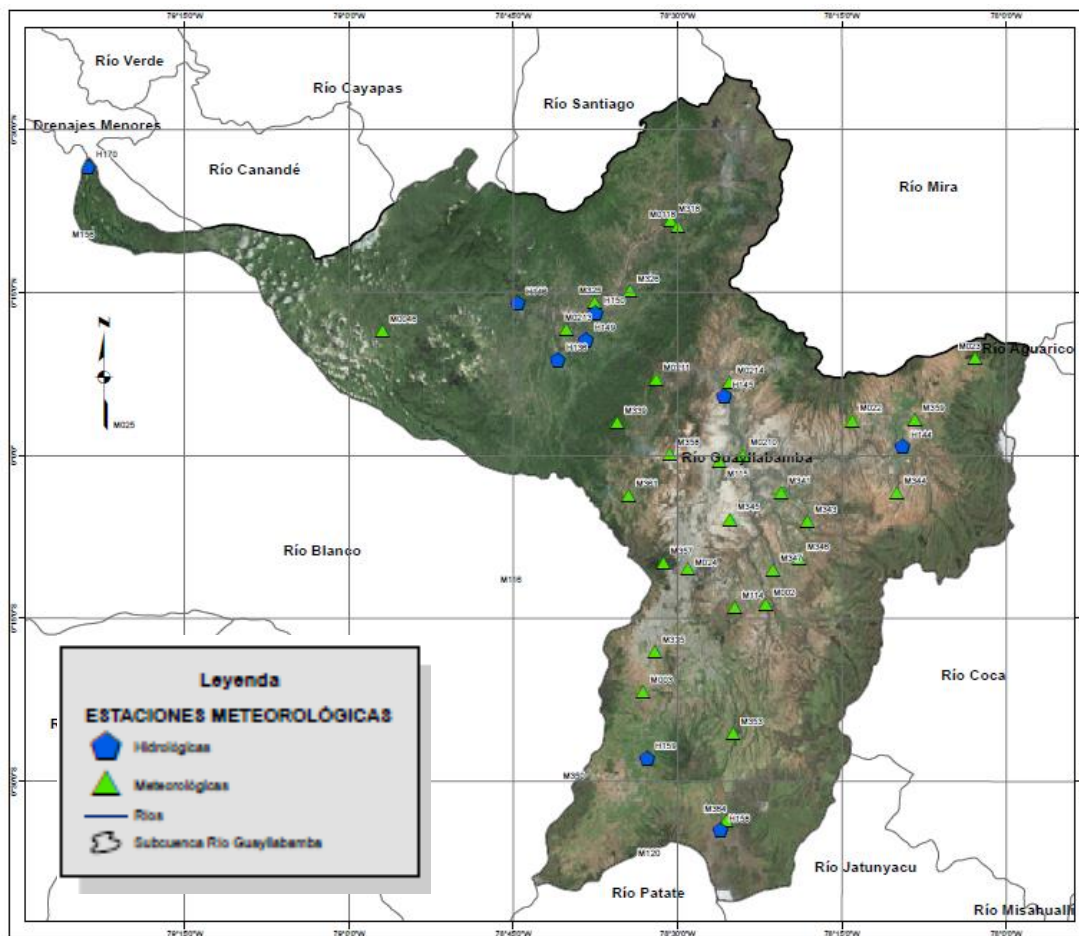


Figura 2 Distribución de las estaciones hidrometeorológicas

### 3.2 Análisis previo de datos hidrometeorológicos

#### 3.2.1 Análisis de Confiabilidad e Intervalo de Tiempo

Las series de datos de precipitación, con las que se realizó el modelo fueron sometidas a procesos de relleno de información, el cual permite estimar datos faltantes para un mejor equilibrio de los datos.

De acuerdo a múltiples investigaciones el periodo de tiempo adecuado para poder utilizar series de datos relacionados a información meteorológica debe ser de al menos 30 años. El intervalo de tiempo que se consideró en este estudio está comprendido entre los años de 1978 a 2010 (33 años), debido a que la mayoría de las estaciones utilizadas, presentan registros de precipitación, evaporación y temperatura en este periodo de tiempo.

El proceso de relleno de datos inexistentes se lo realiza mediante regresión y correlación a partir de información hidrológica y meteorológica de estaciones cercanas que tengan un coeficiente de correlación superior a 0.7 en un periodo común de datos, en la

**Figura 3 Diagrama de dispersión M003 vs M024** se muestra el diagrama de dispersión para dos estaciones (M003, M024) con un coeficiente de correlación considerado como aceptable para el relleno de datos.

El diagrama de dispersión se forma con el conjunto de pares ordenados provenientes de las relaciones entre los datos obtenidos de dos estaciones hidrometeorológicas, en periodos comunes. Es decir que la observación de precipitación del mes de enero, perteneciente al año de 1980 de la estación M003 corresponde a la observación de precipitación del mes de enero para el mismo año de la estación M024. En la **Tabla 5** se muestran los pares ordenados que se utilizan para determinar el coeficiente de correlación entre dos estaciones, para cada mes, y en un periodo común de tiempo.

El coeficiente de correlación ( $r$ ) es el índice que mide el grado de relación entre dos variables cuantitativas. En la Ecuación 3 se expresa la regresión de tipo lineal que se utiliza.

$$\text{Estación}_y = A(\text{Estación}_x) + B \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

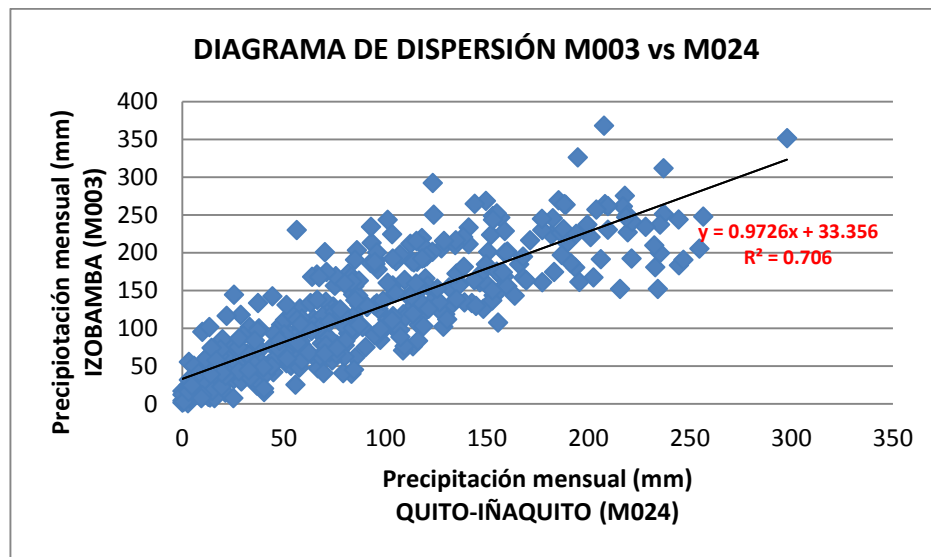
Estación (y) = Variable para la cual se requiere completar los datos.

Estación(x) = Variable independiente, con datos completos para el periodo común.

A y B = Parámetros de regresión

**Tabla 5**  
**Datos para el coeficiente de correlación entre estaciones M003 y M024**

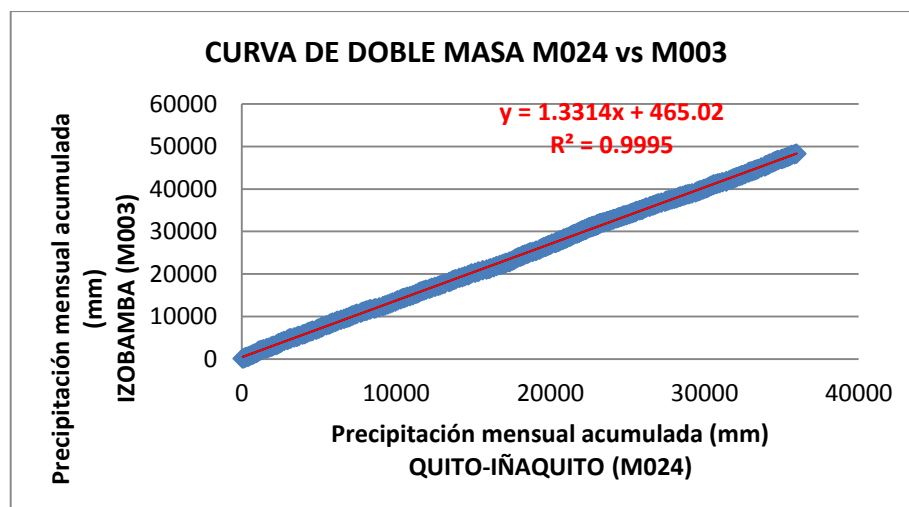
M E S	AÑO			M E S	AÑO			M E S	AÑO			M E S	AÑO			M E S	AÑO			M E S	AÑO		
	M024	M003	M003		M024	M003	M003		M024	M003	M003		M024	M003	M003		M024	M003	M003		M024	M003	M003
ENERO	1975	63.5	105.3	1975	208.2	264.4	1975	206.1	191.7	1975	119.7	166	1975	160.1	155.4	1975	55.6	25.7					
	1976	74.2	129	1976	84.6	155.8	1976	153	248.7	1976	92.8	234.2	1976	122.3	134.1	1976	30.2	47.6					
	1977	70.6	135.2	1977	33.1	101.6	1977	142.6	133.7	1977	87.2	130.4	1977	73.8	57.9	1977	50.5	111.2					
	1978	58.8	77.7	1978	80	77.5	1978	81.6	172.5	1978	115.5	188	1978	75.5	169	1978	13.5	8.7					
	1979	51.8	71.2	1979	43.1	49.9	1979	119	193.4	1979	131.4	154.1	1979	168	166.9	1979	66.7	47.2					
	1980	110.3	76.2	1980	215.6	152	1980	71.3	119.6	1980	116.8	153.4	1980	28.6	64.4	1980	18.6	31.1					
	1981	9.8	95.4	1981	157.5	168	1981	152	223.8	1981	221.5	240.9	1981	57.6	93.6	1981	25.7	76.8					
	1982	140.9	211.5	1982	73.8	125.8	1982	103.6	157	1982	148.3	176.3	1982	158.8	228.6	1982	5.5	31.9					
	1983	95.7	133.2	1983	70.1	87.1	1983	254.7	205.4	1983	209.5	230.6	1983	115.2	215.6	1983	26.8	60.9					
	1984	72.5	69.7	1984	237	311.8	1984	93.2	213.3	1984	217	261.4	1984	70.9	174.5	1984	26.2	68.9					
	1985	57.9	126.3	1985	111.9	124.8	1986	153.3	143.5	1985	116.4	104.7	1985	107.2	197.7	1985	14	25.7					
	1986	92.7	186.4	1986	53.8	82.2	1987	116.2	126.5	1986	154.8	251.9	1986	86	203.6	1986	40.2	15.9					
	1987	70	114	1987	118	219.5	1988	25.2	32.9	1987	136.3	159.6	1987	129.4	159.6	1988	100.2	101.8					
	1988	75.1	156.6	1988	113	188.7	1989	158.8	200	1988	297.8	351.5	1988	114	187.2	1989	64.6	112.2					
	1989	56.3	230	1989	150.2	157.4	1990	79.7	62.4	1989	120.8	156.5	1989	65.4	100.1	1990	21.1	15.2					
	1990	46.6	76.7	1990	48.6	104.7	1991	232.9	180.8	1990	123.3	292.5	1990	19.7	85.7	1991	30	90.9					
	1991	96.7	125.4	1991	68.7	80	1992	105	98.6	1991	84	95.4	1991	104.9	147.7	1992	14.3	37.4					
	1992	51.3	53.9	1992	219.3	227.3	1993	235.2	237.4	1992	96.1	178.1	1992	127.6	121.8	1993	12.7	9.5					
	1993	111.4	141.9	1993	112.2	211.7	1994	244.4	344	1993	228.1	234.1	1993	94.6	130.5	1994	0.9	11.5					
	1994	193.4	180.6	1994	85.2	61.4	1995	118.7	208.4	1994	201.1	220.6	1994	103.2	224.7	1995	97.5	84.8					
1995	14.9	53.9	1995	138.3	220.7	1996	181.8	223.7	1995	158.4	168.8	1995	155.4	107.9	1996	37.2	75.2						
1996	146.5	160.9	1996	13.2	102	1997	167.7	194.9	1996	199.4	237.4	1996	189.4	212.5	1997	58.8	112.8						
1997	140.9	233.4	1997	86.5	143.2	1998	127.5	205.9	1997	83.2	168.1	1997	65.9	104.1	1998	14.5	49.6						
1998	58.1	83.1	1998	237.2	251.3	1999	185.3	269.5	1998	143.9	264.7	1998	193.9	224.9	1999	126.6	134.5						
1999	81.6	93.4	1999	165.8	184.6	2000	149.5	268.8	1999	234.1	152.3	1999	70.1	201	2000	66.4	137.7						
2000	177.3	161.2	2000	63.9	168.2	2001	186.4	226.3	2000	187.6	231.4	2000	123.8	250.5	2001	8.5	38.2						
2001	84.1	144.8	2001	58.1	93.4	2002	123.1	201.4	2001	63.1	133.6	2001	88.8	102	2002	37.3	69.7						
2002	36.6	94	2002	79.1	104.4	2003	100.9	111.5	2002	256.6	248	2002	133.1	132.7	2003	54.1	117.8						
2003	25.4	144.7	2003	34.4	66.1	2004	75.2	74.8	2003	244.6	183.7	2003	28.7	118	2004	11	24.3						
2004	56	58.9	2004	150.6	201.4	2005	134.3	210.2	2004	156.3	150.4	2004	113.8	147.4	2005	31.8	66.2						
2005	37.9	33.3	2005	105.2	188.8	2006	202.5	167.5	2005	84.2	115.7	2005	37.7	100.1	2006	50.2	92.8						
2006	52.3	93.3	2006	67.5	55.1	2007	177.2	229.9	2006	209.5	262	2006	113.6	76.3	2007	22.2	59.7						
2007	66.2	171.3	2007	67.5	55.1	2008	188.8	263.5	2007	188.1	264.3	2007	101	243.6	2008	56.5	111.5						
2008	156.5	246.6	2008	217.9	275.5	2009	173.80	262.4	2009	203.8	257	2008	171.3	216.4	2009	35.00	48.2						
2009	165.80	295.4	2009	141.5	186.6	2010	26.50	114.2	2010	161.30	189.9	2009	62.70	102.8	2010	34.50	100.4						
					103.7					220.40													
										289.2													
FEBRERO	1975	148.2	126.1	1975	57.5	47.9	1975	44.3	76.8	1975	157.8	174.1	1975	95.3	190.5	1975	51.3	131					
	1976	1.4	7.5	1976	1.4	20.2	1976	41.2	40.1	1976	80.3	83.8	1976	90.8	128.3	1976	130.4	112					
	1977	9.5	28.5	1977	18.2	64	1977	119.6	123.1	1977	107.2	97.9	1977	19.4	41.4	1977	117.5	134.4					
	1978	72.6	68.3	1978	3.2	55.8	1978	118.8	103.2	1978	21.3	37.4	1978	75.7	66.5	1978	91.1	129					
	1979	9.3	28.3	1979	76	78.6	1979	154.8	175	1979	46.5	62.6	1979	51.5	59.7	1979	3.2	31.8					
	1980	6.6	14.3	1980	14.7	36.7	1980	67.8	63.4	1980	134.7	216.4	1980	134.9	172.7	1980	70.6	77.6					
	1981	14.9	49.1	1981	58.8	81.2	1981	79.1	40.9	1981	85	190.6	1981	83.6	161.7	1981	112.9	142.3					
	1982	38	34.4	1982	2.7	1.2	1982	66.6	99.2	1982	195.5	161.4	1982	149.5	184.8	1982	207.6	367.9					
	1983	6	19.2	1983	69.6	40.7	1983	11.1	58.5	1983	74.9	121.2	1983	85.1	137.2	1983	218.6	247.1					
	1984	10.2	28.2	1984	39	54.8	1984	163.7	143.2	1984	143.8	163.5	1984	95.8	200.3	1984	21.7	116.5					
	1986	0	2	1986	6	21.3	1986	27.6	75.1	1985	62.2	68.1	1986	116	152.8	1986	70.1	66.8					
	1987	18.3	37.3	1987	10.6	50.5	1987	66.1	108.6	1986	86.8	163.1	1987	8	40.8	1987	4.5	24.3					
	1988	44.8	42.1	1988	50.4	68.6	1988	138.9	134.6	1987	103.7	116	1988	128.8	215.7	1988	63.5	96.9					
	1989	9.3	40.6	1989	36.7	24.5	1989	108.8	118.6	1988	109.5	164.1	1989	13.9	39.2	1989	40.2	20.4					
	1990	15.4	65.4	1990	37.1	25.1	1990	27.8	43.5	1989	191.2	186.4	1990	39.9	48.6	1990	46.8	74.1					
	1991	16.1	43.9	1991	2.9	14.4	1991	69	116.7	1990	246.8	190.6	1991	134.9	138.8	1991	44.3	142.3					
	1992	17.9	24.7	1992	14.7	17.4	1992	109.9	114.9	1991	37.2	133.5	1992	107.4	88.5	1992	45.2	92.7					
	1993	8.2	21.7	1993	3.3	17.1	1993	96	91.4	1992	78.3	118.8	1993	128.5	102.3	1993	177	244.9					
	1994	2.9	24.5	1994	3.4	7.6	1994	27.9	86.8	1993	72	86	1994	166.8	197.1	1994	79.9	159.5					
	1995	42.5	53.2	1995	83.9	100.5	1995	5.7	50.7	1994	90.2	75.2	1995	232.4	209.9	1995	77.8	124.9					
1996	29	30	1996	83.2	39.8	1996	84.5	45.6	1995	152.7	137.1	1996	14.4	74.2	1996	47.7	83.6						
1997	0	4.6	1997	0	17	1997	108.6	71.1	1996	169.4	163.6	1997	219.2	250.3	1997	120.3	195.3						
1998	32.2	37.6	1998	18.8	72	1998	58.8	57.4	1997	152.7	150.5	1998	138.6	181.4	1998	32.6	44.7						
1999	25.1	7.9	1999	24.8	43.6	1999	136.3	157.2	1998	103.6	192.5	1999	101	160.3	1999	221.2	192.5						
2000	22.1	42.6	2000	9.7	28.8	2000	67.3	167.7	1999	87.1	104.2	2000	16.7	57.9	2000	76.1	73.7						
2001	35	36.1	2001	0	12.4	2001	94.6	91.4	2000	43.8	49.9	2001	113.6	119	2001	118.1	192.6						
2002	8.2	26.5	2002	9.8	11.8	2002	19.2	22.9	2001	9.3	7.9	2002	95	185	2002	152.9	243.6						
2003	15.7	7.9	2003	36.2	32.2	2003	67.8	101.3	2002	144.6	129.6	2003	158.4	200.1	2003	103.2	110.5						
2004	6.7	28.6	2004	0.6	3.1	2004	97.6	98.7	2003	117.7	153.2	2004	125.5	152.7	2004	94.8	187.7						
2005	53.4	50.6	2005	26.8	53.9	2005	35.6	84.1	2004	98.8	136.3	2005	58.4	105.8	2005	115.1	159.4						
2006	3.1	13.1	2006	3.5	23.6	2006	35.6	51.6	2005	116	83.7	2006	162.4	245.9	2006	183	174.6						
2007	12.5	62.6	2007	33.4	34.8	2007	3	18.4	2006	109.5	76.5	2007	194.7	326.2	2008	121.2	126						
2008	12.3	28.5	2008	37	96.7	2008	58.7	103.1	2007	160.1	201.9	2008	72.4	108	2009	120.00	209.9						
2009	2.60	7.1	2009	1.00	29	2009	7.40	9.7	2008	23													



**Figura 3 Diagrama de dispersión M003 vs M024**

Para evaluar la homogeneidad de las series de datos se realiza un análisis de curva de doble masa, que demuestra de manera gráfica la relación que existe entre dos estaciones circundantes para un periodo de tiempo común. Para lo cual se utilizan los valores de la tabla 5 acumulados.

Los datos mensuales de cada una de las estaciones se acumulan sucesivamente, para formar pares ordenados que se presentan en un gráfico de dispersión (ver **Figura 4**). Asumiendo su homogeneidad cuando se presenta una tendencia lineal con pendiente constante.



**Figura 4 Curva de doble masa M024 vs M003**



Una vez analizada la consistencia de la información mediante doble masas se determinó que la totalidad de los datos de las estaciones meteorológicas e hidrológicas consideradas previamente son homogéneos, por lo que se las considera válidas.

### **3.2.2 Definición de períodos de cálculo para la modelación**

En la región Interandina históricamente existen dos periodos, el período lluvioso se inicia aproximadamente en el mes de octubre y finaliza en el mes de mayo, con una distribución bimodal, debido a que en este periodo existen dos picos. El período seco o verano se extiende desde el mes de junio a septiembre (INAMHI, 2013).

Se analiza la distribución temporal de la variable de precipitación de las estaciones que se van a utilizar, para determinar las épocas del año en el cual las variables tengan comportamientos similares. En la **Figura 5** se muestra la variación de la precipitación media mensual multianual.

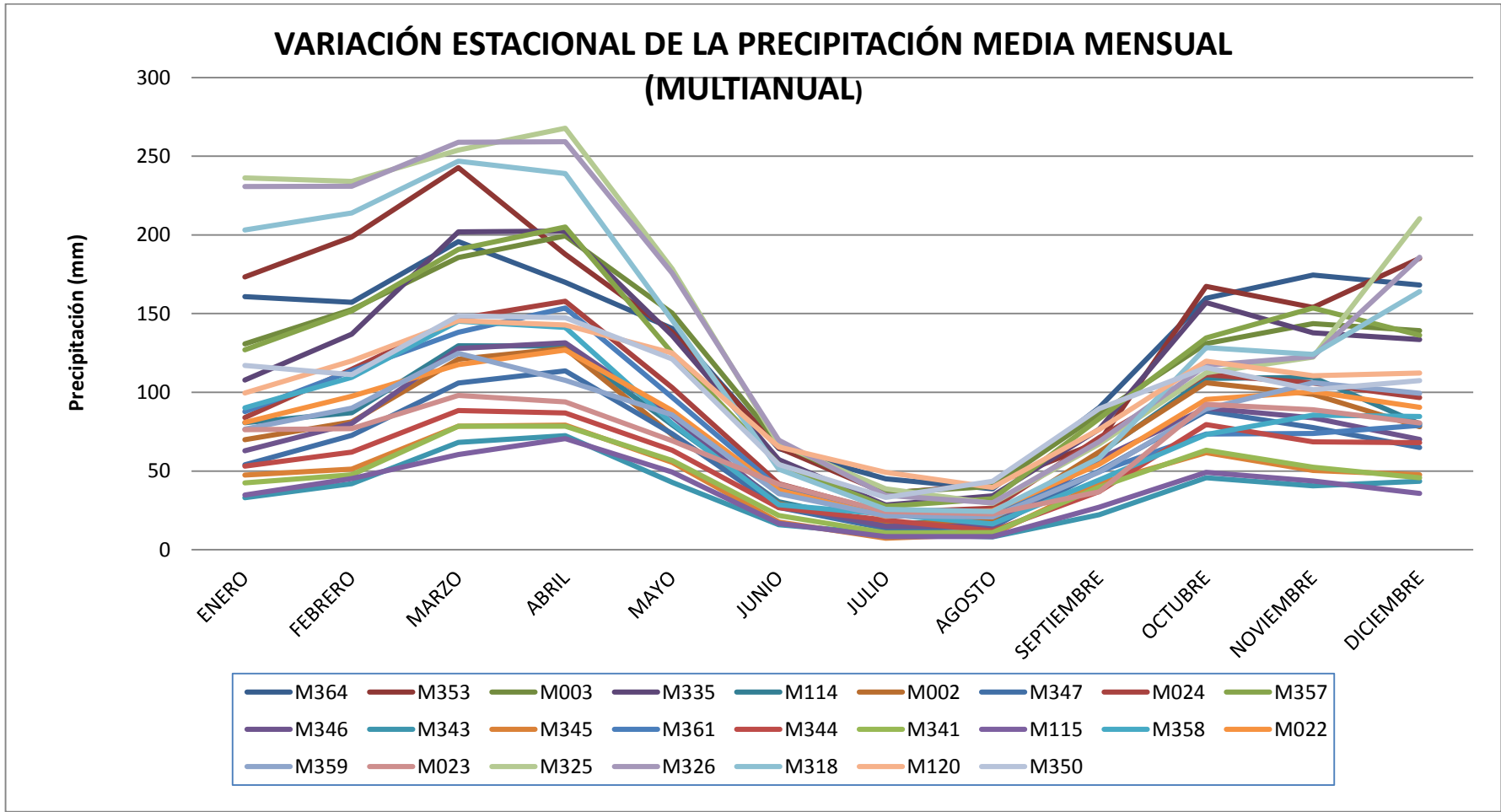


Figura 5 Variación estacional de la precipitación media mensual

De acuerdo al comportamiento de los datos de precipitación de las estaciones seleccionadas en el periodo de tiempo determinado, se puede extraer que existen dos épocas diferentes. La época lluviosa que va desde septiembre a mayo (9 meses), y la época seca, que comprende los meses de junio, julio y agosto. Por lo que se realiza análisis diferenciados de estos periodos.

Se debe tomar en cuenta que el comportamiento de factores climáticos como la precipitación y la evaporación a lo largo de los años es muy variable, debido a diferentes circunstancias. Es por eso que los análisis meteorológicos ocupan datos que han sido registrados en periodos extensos, con lo cual se pretende normalizar el comportamiento de estas variables. Sin embargo siempre es importante conocer los máximos o mínimos valores que se han generado es por eso que se genera gráficos en los cuales se muestre el comportamiento de esta variable. En la **Figura 6** se muestra el comportamiento de la variable precipitación de la estación M003 en el periodo de tiempo (1978-2010).

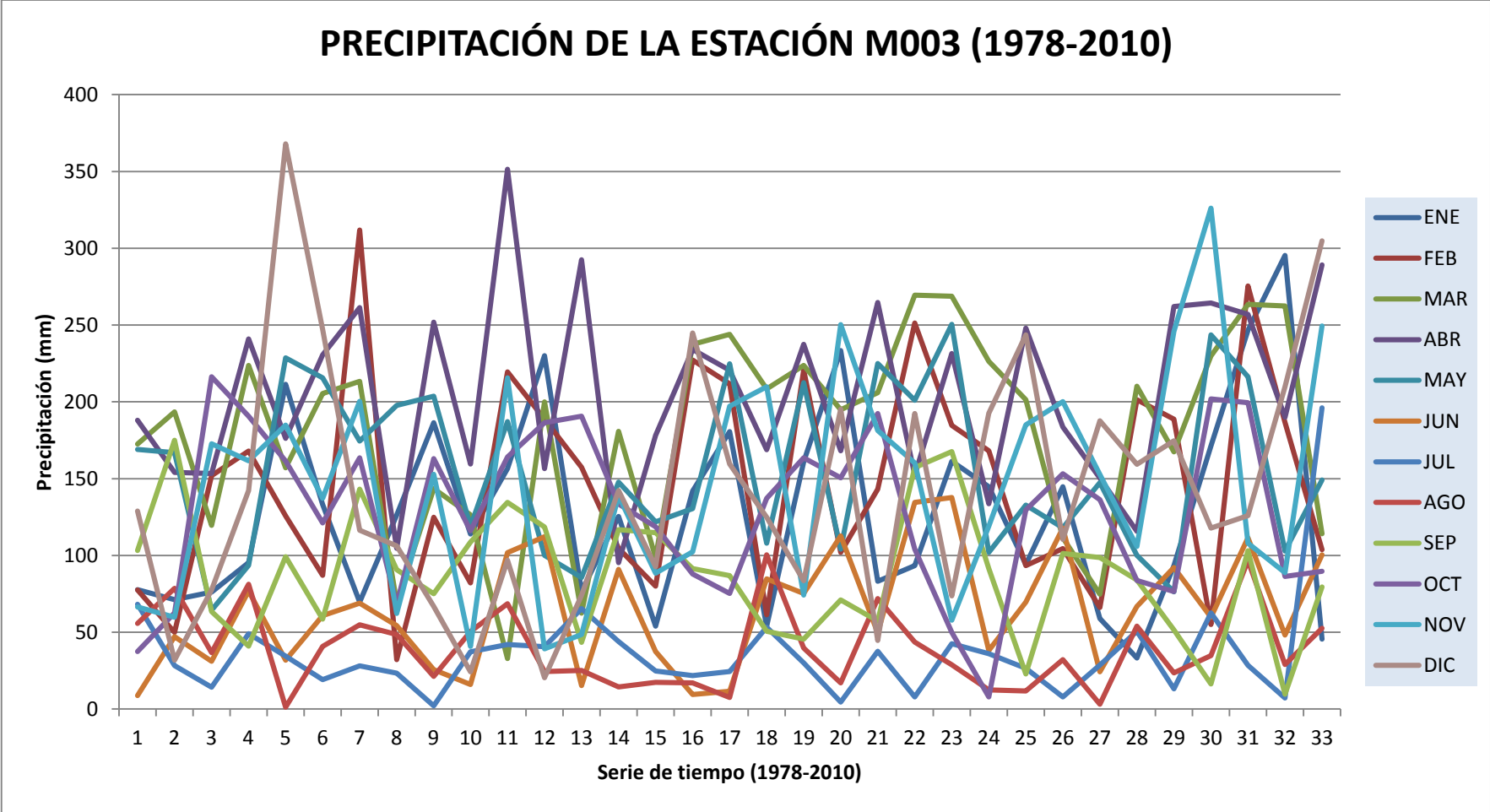


Figura 6. Precipitación de la estación M003 en el periodo de tiempo (1978-2010)

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, los valores de la precipitación a lo largo de los años pueden variar de forma particular para cada mes. Por ejemplo los valores medidos de precipitación de la estación M003 para el mes de enero de 1978 son de alrededor de 55 mm, lo que contrasta con los valores que se presentan para el mismo mes en el año 2009, los cuales son de alrededor de 20 mm. Diferencia que haría pensar en una disminución exagerada en la precipitación a lo largo del tiempo si no se toma en cuenta el comportamiento irregular de este mes.

De manera general se evidencia un comportamiento periódico entre valores altos y bajos para todos los meses. Esto quiere decir que en un lapso de tiempo de aproximadamente 30 años los valores tanto altos como bajos se vuelven a presentar cada cierto tiempo, lo que se conoce como periodo de retorno. Para dar una mejor idea de este comportamiento se calcula el periodo de retorno para el mes de diciembre de esta estación debido a que de acuerdo a la gráfica, este mes presenta los picos más notorios en valores de precipitación.

Para determinar el periodo de retorno se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{1}{\text{frecuencia}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\text{frecuencia} = \frac{\text{Orden}}{N + 1} \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde el orden se refiere a la numeración de cada año, que corresponde a la ubicación en forma descendente de los valores de precipitación. Siendo 1 el valor de precipitación más alto y 33 el valor de precipitación más bajo. N se refiere al número de observaciones que existen, en este caso 33 años.

**Tabla 6**  
**Datos utilizados para determinar el factor de retorno.**

Orden	Año	Precipitación (mm)	Frecuencia	Periodo de retorno (años)
1	1982	367,9	0,029	34,0
2	2010	304,8	0,059	17,0
3	1983	247,1	0,088	11,3
4	1993	244,9	0,118	8,5
5	2002	243,6	0,147	6,8
6	2009	209,9	0,176	5,7
7	1997	195,3	0,206	4,9
8	2001	192,6	0,235	4,3
9	1999	192,5	0,265	3,8
10	2004	187,7	0,294	3,4
11	2006	174,6	0,324	3,1
12	1994	159,5	0,353	2,8
13	2005	159,4	0,382	2,6
14	1981	142,3	0,412	2,4
15	1991	142,3	0,441	2,3
16	1977	134,4	0,471	2,1
17	1975	131	0,500	2,0
18	1978	129	0,529	1,9
19	2008	126	0,559	1,8
20	1995	124,9	0,588	1,7
21	1984	116,5	0,618	1,6
22	1976	112	0,647	1,5
23	2003	110,5	0,676	1,5
24	1988	96,9	0,706	1,4
25	1992	92,7	0,735	1,4
26	1996	83,6	0,765	1,3
27	1980	77,6	0,794	1,3
28	1990	74,1	0,824	1,2
29	2000	73,7	0,853	1,2
30	1986	66,8	0,882	1,1
31	1998	44,7	0,912	1,1
32	1979	31,8	0,941	1,1
33	1987	24,3	0,971	1,0
34	1989	20,4	1,000	1,0

Fuente: (INAMHI, 2010)

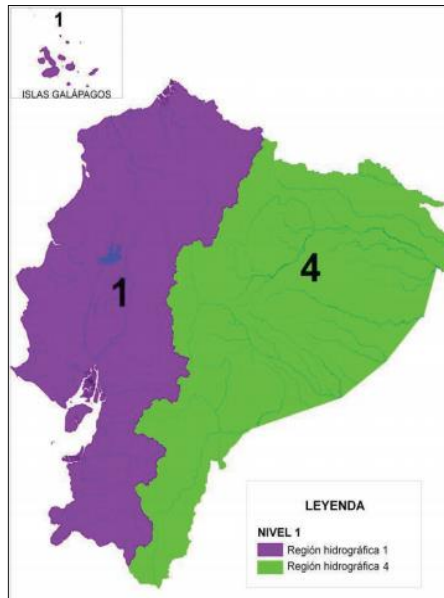
Como se puede apreciar en la tabla el valor de precipitación registrado para el año 1982 (observación 5 para la gráfica) es de 367,9 mm, y tiene un periodo de retorno de 34 años con lo que se predice que una cantidad de lluvia muy similar se presentará en diciembre de 2016. De igual manera se puede apreciar que el segundo valor más alto de precipitación corresponde al 2010 (304,8 mm), con un periodo de retorno de 17 años. Esto quiere decir que en 1993 (observación 16 para la gráfica) hubo un valor aproximado al del 2010, en este caso 244,9 mm. Con lo que se puede estimar el comportamiento de una variable como la precipitación a partir de series anuales de datos.

### 3.3 Delimitación hidrográfica del área de estudio

La delimitación hidrográfica de la cuenca se la realiza en base a la división oficial de unidades hidrográficas de SENAGUA, que se obtuvo mediante la metodología Pfafstetter, el cual es un sistema adoptado a nivel internacional que asigna identificadores a unidades de drenaje en base a la ubicación espacial de dicha unidad, para relacionarla con sus unidades internas locales y con las unidades colindantes (SENAGUA, 2009).

Este sistema se encuentra organizado en 5 niveles. De los cuales la subcuenca del río Guayllabamba pertenece al nivel 4. A continuación se presenta una descripción de cada uno de los distintos niveles.

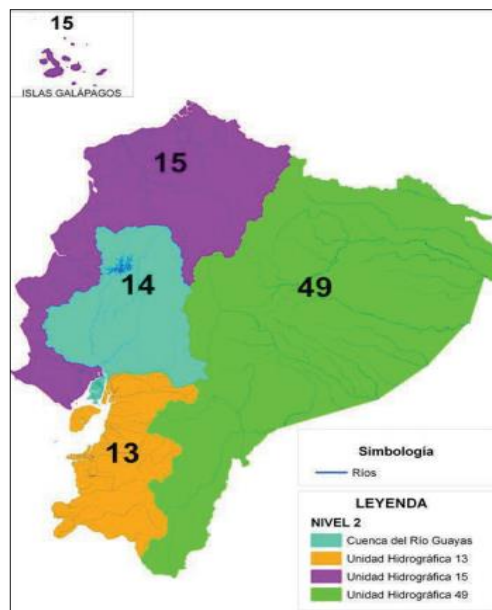
- a) **Nivel 1.** Comprende 2 regiones hidrográficas o vertientes (
- b) Figura 7)
  - Pacífico ( Región Hidrográfica 1)
  - Amazonas (Región Hidrográfica 4)



**Figura 7 División nivel**

Fuente: (SENAGUA, 2009)

- c) **Nivel 2.** Comprende 4 unidades hidrográficas, 3 se encuentran en la región hidrográfica del Pacífico y 1 en la del Amazonas (Figura 8).

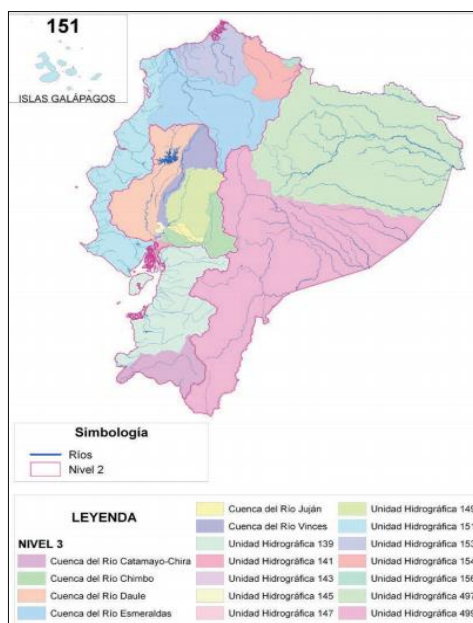


**Figura 8 División nivel 2**

Fuente: (SENAGUA, 2009)

- d) **Nivel 3.** Comprende 18 unidades hidrográficas, 16 se encuentran en la región hidrográfica del Pacífico y 4 en la del Amazonas (ver Figura 9).

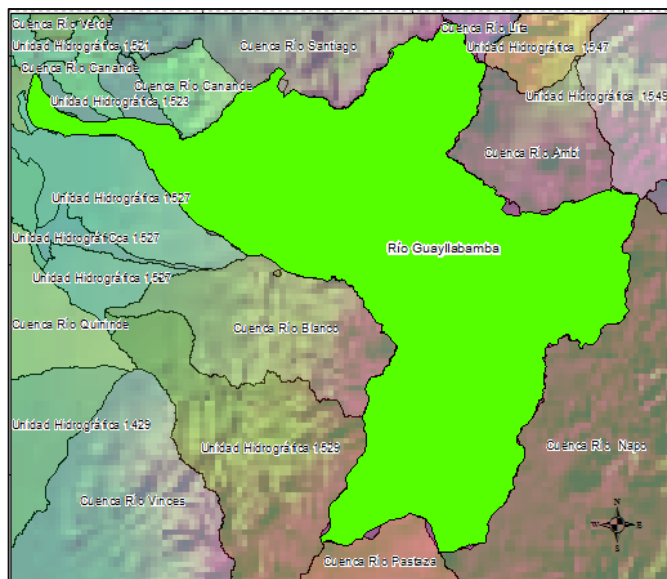




**Figura 9** División nivel 3

Fuente: (SENAGUA, 2009)

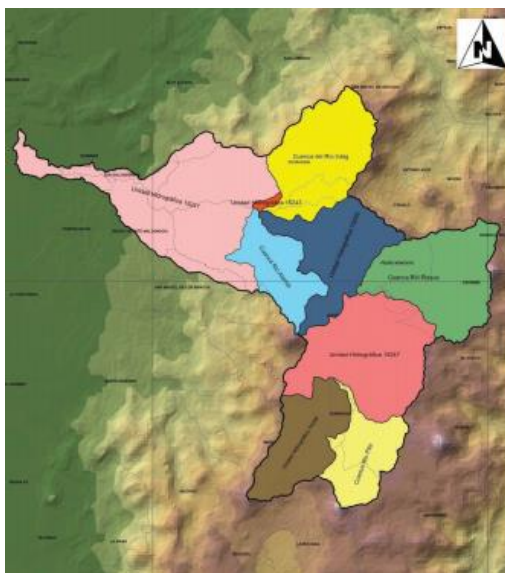
- e) **Nivel 4.** Comprende 123 unidades hidrográficas, 117 se encuentran en la región hidrográfica del Pacífico y 6 en la del Amazonas (Figura 10). En este nivel se encuentra la subcuenca del río Guayllabamba.



**Figura 10** División nivel 4

Fuente: (SENAGUA, 2009)

- f) **Nivel 5.** Comprende 734 unidades hidrográficas, 710 se encuentran en la región hidrográfica del Pacífico y 23 en la del Amazonas (Figura 11). Se muestra la división de la Subcuenca del Guayllabamba en unidades hidrográficas nivel 5.



**Figura 11** División nivel 5

Fuente: (SENAGUA, 2009)

En la Tabla 6 se encuentra la descripción de las características de las unidades hidrográficas que forman parte de la de subcuenca del Guayllabamba.

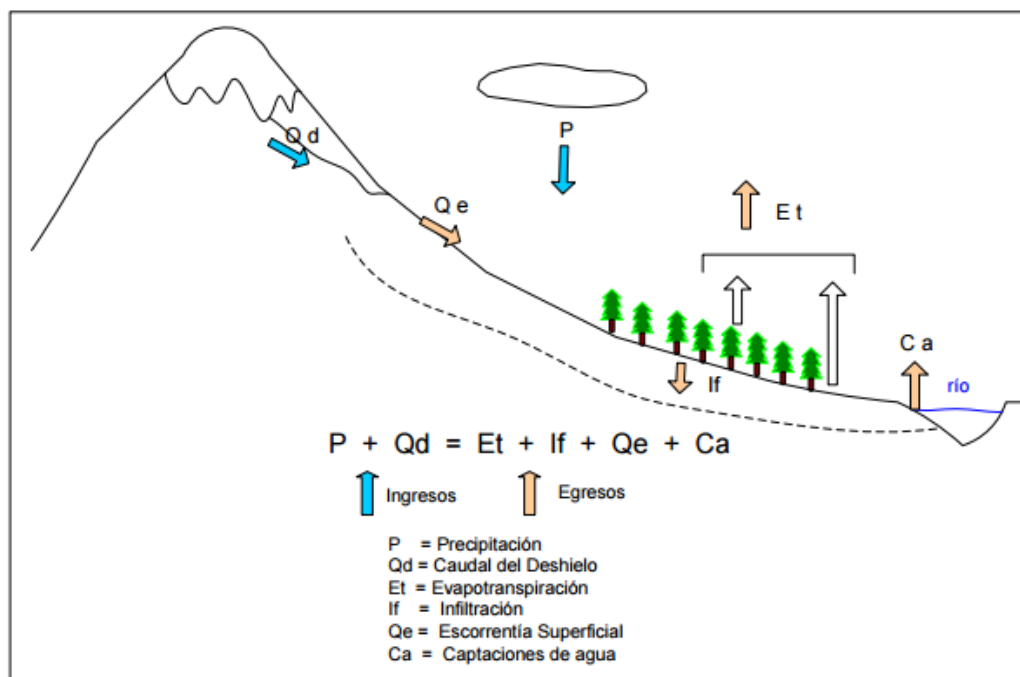
**Tabla 6**  
**Unidades hidrográficas de la Subcuenca del Río Guayllabamba**

U. HIDROGRÁFICAS NIVEL 4	U. HIDROGRÁFICAS NIVEL 5	COD PFAFSTETTER	EXTENSIÓN (Km <sup>2</sup> )
GUAYLLABAMBA (1524)	GUAYLLABAMBA BAJO	15241	1860
	ALAMBÍ	15242	540
	QUEBRADA SAN ANDRÉS	15243	28,9
	INTAG	15244	1040
	GUAYLLABAMBA MEDIO	15245	891
	PISQUE	15246	1140
	GUAYLLABAMBA ALTO	15247	1350
	PITA	15248	592
	SAN PEDRO	15249	753

Fuente: (SENAGUA, 2009)

### 3.4 Ecuación del balance hídrico

En el estudio realizado por (Coello, 2007) se presenta la ecuación general del balance hidrológico, donde se estable las siguientes variables. Para los ingresos se consideran las precipitaciones y el caudal de deshielo, y para los egresos se toman en cuenta la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la infiltración y las captaciones de agua. En la Figura 12 se muestra una representación de las variables que intervienen en la ecuación del balance hidrológico.



**Figura 12** Representación gráfica del balance hídrico

Fuente: Adaptado de (Coello, 2007)

Al despejar el caudal de escorrentía superficial de la fórmula del balance hidrológico se obtiene la Ecuación 6:

$$Qe = P + Qd - Et - If - Ca \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Qe = Escorrentía superficial

P = Precipitación

Qd = Caudal de deshielo

Et = Evapotranspiración

If = Infiltración

Ca = Captaciones de agua

Por muchos años la administración, otorgamiento, control y registro de las concesiones y autorizaciones a captaciones de agua estuvo a cargo del Instituto Nacional de Recursos Hídricos (INHERI). En la actualidad dicha responsabilidad es competencia de SENAGUA, de acuerdo a un análisis de la información por parte de esta institución los registros de las autorizaciones de las concesiones de agua (CEPAL, 2012), se determinó que existen muchas inconsistencias en la información tanto espacial, como alfanumérica que no permite la utilización de estos datos. Por lo que en julio de 2015 se inició un proceso de depuración del Banco Nacional de Autorizaciones (BNA), que recién estará listo para mediados del 2016.

Es por eso que en el presente proyecto se descarta del balance general propuesto por Coello en 2007, la variable de captaciones de agua. Así mismo se determina que la variable de caudal de deshielo no se la va a utilizar, debido a que la información existente sobre este parámetro es escasa y carece de confiabilidad. En cambio se propone que mediante el proceso de calibración de los resultados, se puede corregir los errores generados por la omisión de estas variables. Por lo que la Ecuación 7 es la propuesta.

$$Q \text{ escorrentía} = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} - \text{Infiltración} \quad \text{Ecuación 7}$$

La metodología general que se siguió para el cálculo y validación del modelo hidrológico de la subcuenca del río Guayllabamba esta descrita en forma de diagrama en la figura. El modelo cartográfico para la determinación de la oferta hídrica se muestra en la **Figura 14 Modelo Cartográfico de la Oferta Hídrica en la Subcuenca del Río Guayllabamba.**

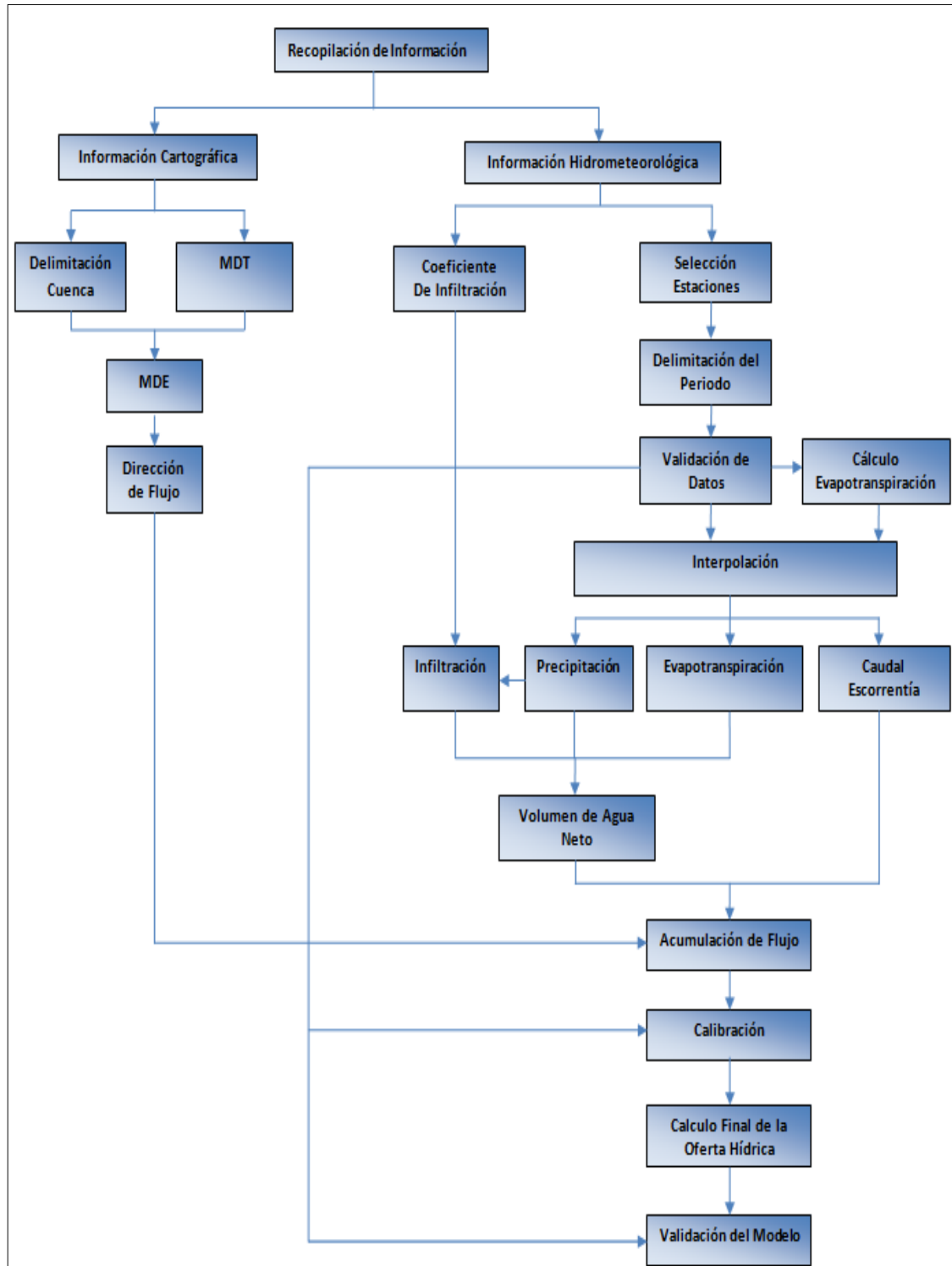


Figura 13 Esquema General de la Metodología

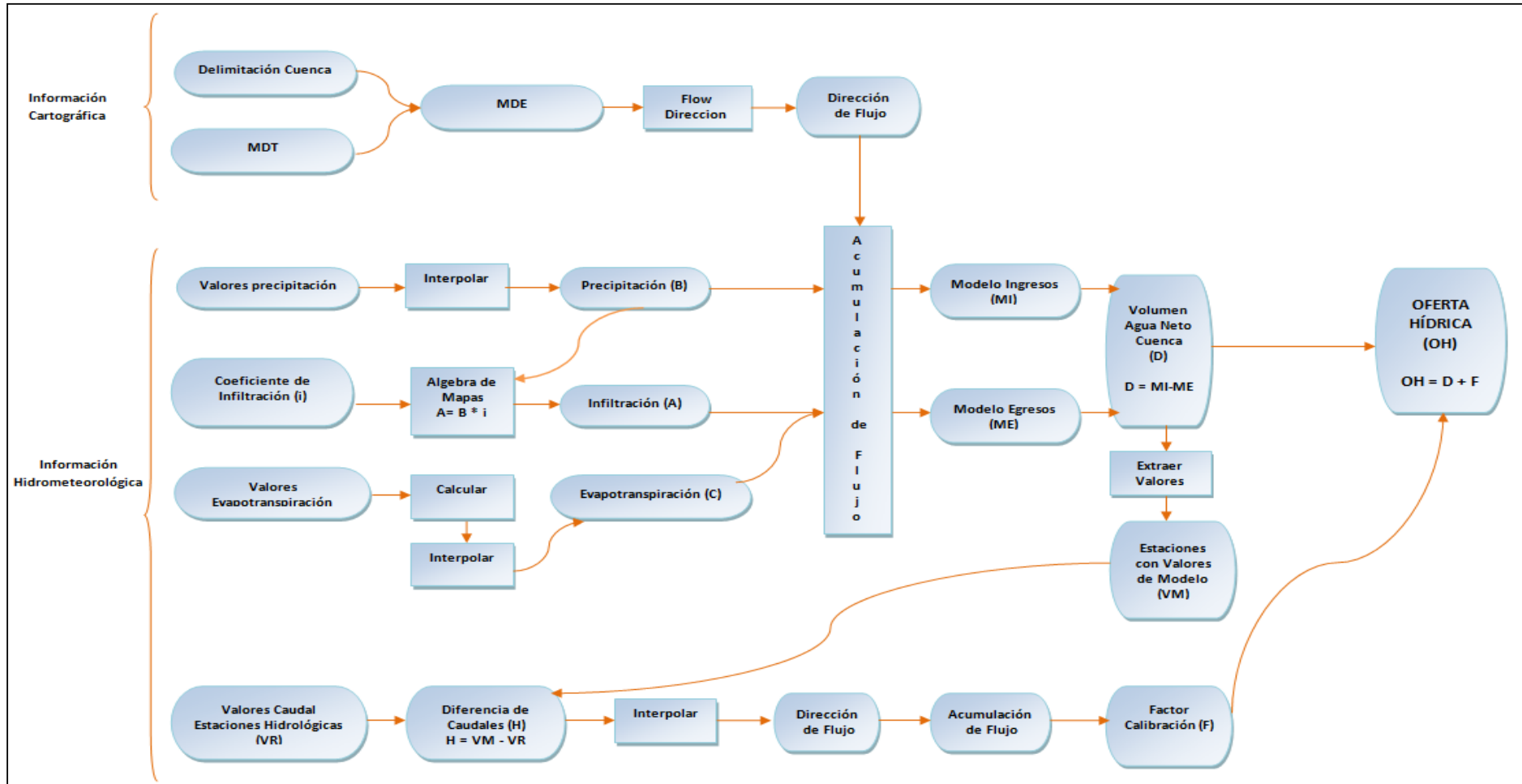


Figura 14 Modelo Cartográfico de la Oferta Hídrica en la Subcuenca del Río Guayllabamba

### 3.5 Escala de trabajo y tamaño del pixel

La geografía es una ciencia espacial que combina distintas escalas para analizar los fenómenos que ocurren en el espacio geográfico, sean estos a nivel global, regional o local. Algunos de estos fenómenos se encuentran dentro del campo de estudio de la climatología, donde para analizar su comportamiento se utilizan entre otros, datos de precipitación, evaporación y temperatura, que son parámetros que presentan variación tanto en origen como en forma, por lo que se consideran asuntos de escala, y por ende asuntos geográficos (Vargas, 2004).

Basados en el área de estudio del proyecto que tiene una extensión de 8200 Km<sup>2</sup> correspondiente a la subcuenca del río Guayllabamba, se plantea utilizar una escala a nivel regional, entre las que se encuentran las siguientes: 1:25 000, 1:50 000 y 1:100 000. A fin de establecer la escala de trabajo apropiada, el presente estudio ha considerado la distribución espacial de las estaciones meteorológicas así como, los datos de elevación del terreno (Modelo Digital de Elevación).

Otro punto que se debe considerar es el tamaño de pixel, que se encuentra estrechamente relacionado a la escala de trabajo, es por eso que se busca una concordancia entre estos dos parámetros. Para determinar el tamaño de pixel se debe tener en cuenta el tipo de modelo que se va a obtener y los datos que se van a extraer. Debido a que lo que se requiere es modelar el caudal de escorrentía de los cauces de la subcuenca del río Guayllabamba, se toma en consideración el ancho promedio de los ríos principales en la zona de estudio (13 metros), con lo que se determina que el tamaño del pixel va a ser de 13m \* 13m.

Diversos estudios e instituciones mencionan y utilizan fórmulas que determinan la relación directa entre el tamaño del pixel y la escala. El Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales (ESRI), líder mundial en el desarrollo de software para sistemas de información geográfica, plantea la Ecuación 8 (ESRI, 2014).

$$\text{Escala de trabajo} = \text{Tamaño de pixel} * \frac{96}{0.0254} \quad \text{Ecuación 8}$$

La escala de trabajo resultado de la multiplicación del tamaño de pixel con el factor de relación es de 1:49.133. Por lo que se determina que la escala del modelo debe ser de 1:50.000. A pesar que se cuente con información a gran detalle de la elevación del terreno (MDT con tamaño de pixel de 3m), y se pudiera utilizar un tamaño de pixel más pequeño para obtener una escala que represente mayor detalle, la distribución espacial de las estaciones meteorológicas no lo permite.

### 3.6 Modelo digital de elevación

Se denomina Modelo Digital del Terreno (MDT) al conjunto de información que representa distintas características de la superficie terrestre derivadas de un Modelo Digital de Elevación (MDE). Aunque varias definiciones incluyen dentro de los MDT prácticamente cualquier variable cuantitativa regionalizada, se prefiere limitar el MDT al conjunto de capas derivadas del MDE (Universidad de Murcia, 2007).

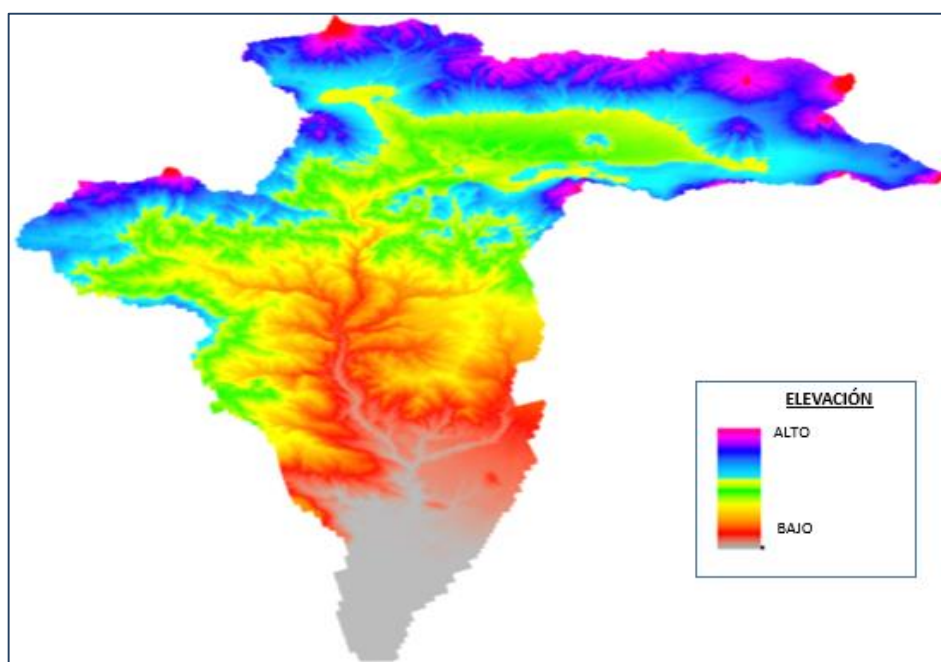
Un Modelo Digital de Elevación (MDE) posee una estructura numérica y digital que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bi-dimensional (Burgos & Salcedo, 2012).

Es por eso que un Modelo Digital de Elevación (MDE) constituye una parte fundamental del análisis hidrológico, debido a que tiene valores de elevación, que determinan como el agua fluye a través de superficie del terreno. Para el presente estudio se utilizó el MDE proporcionado por SIG-Tierras, el cual se lo obtuvo con información de un periodo reciente (2010 - 2014) y presenta un tamaño de pixel de 3 metros.

Para ajustar el tamaño de pixel del MDE con el determinado previamente (13m \*13 m), se aplica una técnica de remuestreo bilineal, que se utiliza generalmente para datos continuos como la elevación.



Debido a que la información que maneja el SIG-TIERRAS, se encuentra dividida por cantones, se realizó un mosaico entre los diferentes archivos, para obtener finalmente el Modelo Digital de Elevación de la subcuenca del río Guayllabamba. En la **Figura 15** se muestra el MDE final, corregido las anomalías existentes en la unión.



**Figura 15 Modelo digital de elevación del área de estudio**

### **3.7 Cálculo de los parámetros que intervienen en el balance hidrológico**

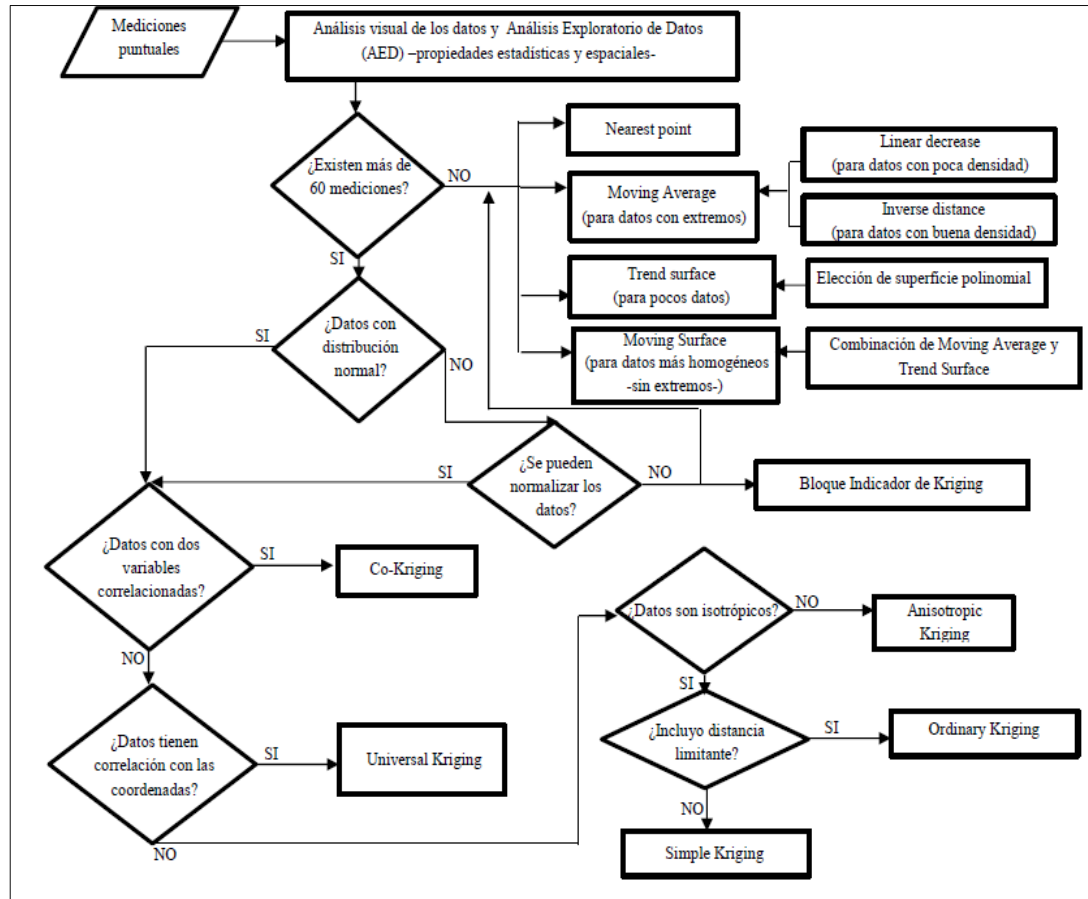
A continuación se describen los procesos y las consideraciones realizadas para obtener cada uno de los parámetros que se propone usar en la ecuación del balance hidrológico.

#### **3.7.1 Precipitación**

Para determinar la precipitación en toda el área de estudio se llevo a cabo un proceso de interpolación a partir de los datos mensuales (media multianual) de precipitación en mm, de las estaciones meteorológicas. La interpolación es el procedimiento de predecir el valor de una variable en un punto no muestral a partir de valores de esa variable en puntos muestrales, situados dentro de la misma área o región(UM, 2008).

Existen varios métodos de interpolación y todos dependen de las distribuciones de las observaciones en el espacio. Observaciones densamente, uniformemente distribuidas conducen a estimaciones razonablemente buenas; mientras que observaciones dispersas, agrupadas, con lagunas de datos conducen a estimaciones poco fiables (Comisión Nacional del Agua, 2010). Si bien es cierto cada caso es diferente y se deben analizar las varianzas para determinar cual se debe utilizar, también es cierto que con la revisión de la literatura se puede optimizar la determinación de cuál sería el método que mejor se ajusta a los datos existentes.

El método de kriggeado es considerado bastante complejo matemáticamente y muy exigente en cuanto a la calidad de los datos muestrales de la variable que se interpola. Es por eso que muchos autores coinciden en que si esta no es adecuada son preferibles los modelos de medias ponderadas que son los más utilizados tradicionalmente debido a la sencillez de su manejo y a su robustez. En la Figura 16 **Flujograma para determinar el mejor método de interpolación**, se muestra un flujograma que determina el mejor método de interpolación de acuerdo al número y la densidad de mediciones; a la presencia de valores extremos y a la correlación de variable (UM, 2008).



**Figura 16** Flujograma para determinar el mejor método de interpolación. Fuente: (Moreno, 2014)

Existen estudios como el realizado por la Universidad de Murcia sobre la interpolación a partir de puntos e isolíneas, que indican que el método de interpolación por medias ponderadas que mejor se ajusta al tipo de datos estacionarios como los que proporcionan las estaciones meteorológicas es el método de los splines. Este método ajusta funciones polinómicas en las que las variables independientes son  $x$  e  $y$ . La forma de la superficie final va a depender de un parámetro de tensión que hace que el comportamiento de la superficie interpolada tienda a asemejarse a una membrana más o menos tensa o aflojada que pasa por los puntos de observación (UM, 2008).

Para el proceso de interpolación se utilizó la herramienta spline, del software ArcGIS, la cual interpola una superficie de raster a partir de puntos utilizando una técnica de spline de curvatura mínima bidimensional. La superficie de alisado resultante pasa exactamente a través de los puntos de entrada. El tamaño de pixel que se utilizó es el determinado previamente (13

m). Y el tipo de *spline* fue el de tensión, el cual ajusta al modelo exactamente en los lugares donde están los valores de entrada (ESRI, 2015).

### 3.7.2 Evapotranspiración

Para el cálculo de los valores de evapotranspiración se utiliza el método de Penman-Monteith, utilizado y comprobado por numerosas investigaciones en diferentes lugares con características distintas, por lo cual posee bases físicas sólidas para la obtención de valores de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

Para establecer un método estandarizado que pueda utilizarse a nivel mundial, la FAO en 1990 propone el método FAO Penman-Monteith el cual incluye los procedimientos para el cálculo de varios parámetros que la fórmula requiere. Para lo cual se propone establecer un cultivo de referencia, el mismo que se asemeja a una superficie extensa de pasto verde, bien regado, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo, con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial de 70 s/m y un albedor de 0,23 (FAO, 2006).

La Ecuación 9, la cual se muestra a continuación es en la que se basa el modelo de Penman-Monteith para el cálculo de la E<sub>to</sub>.

$$ET_o = \frac{C}{L} \frac{sR_N + c_p \rho_a \frac{(e_a - e_d)}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración Estándar del cultivo de referencia (mm/d)

C = Constante para convertir unidades de kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> a mm.d<sup>-1</sup> (C=86400)

RN = Radiación neta sobre la superficie terrestre

L = Calor latente de vaporización (L=2.45x10<sup>6</sup> J/kg)

s = Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación-temperatura.

$C_p$  = Calor del aire a presión constante (0,237)

$P_a$  = densidad del aire

$e_d$  = Presión actual de vapor del aire

$e_a$  = Presión del vapor de saturación para la temperatura del aire

$\gamma$  = Constante psicrométrica

$r_a$  = Resistencia aerodinámica

$r_c$  = Resistencia del cultivo

El método Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración potencial incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse fácilmente de datos meteorológicos a partir de cuatro variables principales. La temperatura, la humedad relativa, el viento y la nubosidad. A demás de la densidad atmosférica (depende de la elevación) y constantes como la radiación extraterrestre y la resistencia del cultivo.

Los diferentes procedimientos para el cálculo de los parámetros que intervienen en la fórmula para determinar la evapotranspiración de un cultivo de referencia se detallan a continuación (Ecuaciones 10-20).

Teniendo una altura estandarizada para la velocidad del viento, la temperatura y las mediciones de humedad a 2 metros ( $z_m = z_h = 2m$ ) y la altura del cultivo  $h = 0,12$  m.

#### **Presión Atmosférica ( $P_a$ )**

$$P_a = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

Z: Altura de la estación

#### **Constante Psicométrica ( $\gamma$ )**

$$\gamma = 0.00066 \text{ Pa} \quad \text{Ecuación 11}$$

#### **Densidad Atmosférica ( $\rho_a$ )**

$$p_a = \frac{p_a}{0.287(T + 205)}$$

Ecuación 12

Donde:

T: Temperatura

### Presión de Saturación ( $e_a$ )

$$e_a = 0.6108e^{\frac{17.27T}{237.3+T}}$$

Ecuación 13

### Pendiente de la curva (s)

$$S = \frac{4098e_a}{(237.3 + T)^2}$$

Ecuación 14

### Presión actual

$$S = \frac{4098e_a}{(237.3 + T)^2}$$

Ecuación 15

Donde:

HR: Humedad Relativa

### Resistencia Aerodinámica ( $r_a$ )

$$r_a = \frac{208}{V}$$

Ecuación 16

Donde:

V: Velocidad del viento a 2 m de altura

### Horas de luz relativa ( $n/N$ )

$$\frac{n}{N} = 0.0049 Oc^2 - 0.0731 Oc + 0.9318$$

Ecuación 17

Donde:

Oc: Nubosidad Octavas

### Radiación extraterrestre (RA)

Invierno = 419.67

Verano=393.67

### Radiación Onda Corta (Rs)

$$R_s = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N}\right) RA \quad \text{Ecuación 18}$$

### Radiación Onda Larga ( R<sub>nL</sub>)

$$R_{nL} = 5.6745 * 10^{-8} (273 + T)^4 (0.34 - 0.139\sqrt{ed})(0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad \text{Ecuación 19}$$

### Radiación Neta (RN)

$$R_N = (1 - r)R_s - R_{nL} \quad \text{Ecuación 20}$$

R = coeficiente de reflejo del pasto (0.23)

En Figura 17 se muestra el proceso matemático al que se someten los datos de estas estaciones para obtener el valor de evapotranspiración de referencia utilizando las ecuaciones descritas previamente.

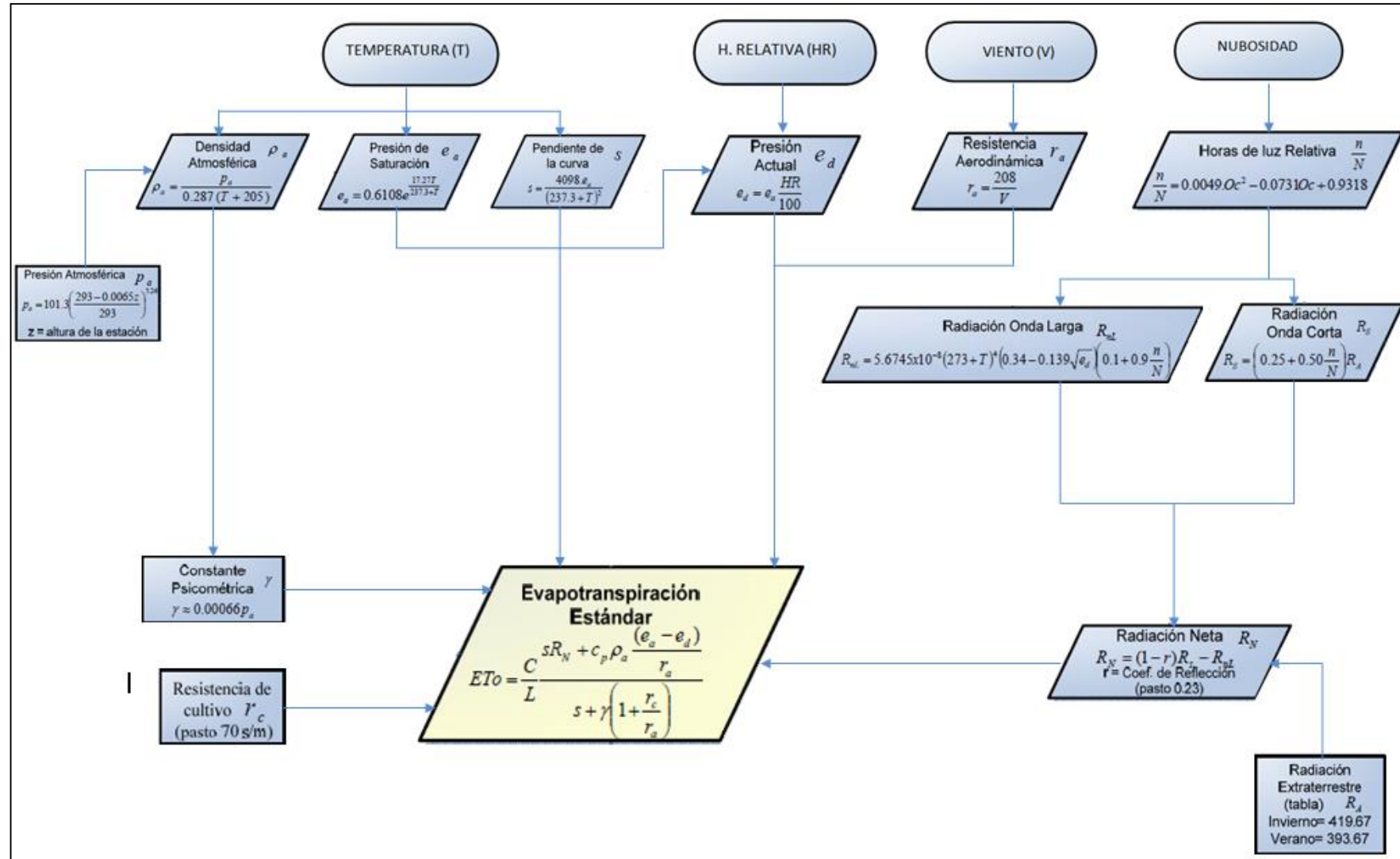
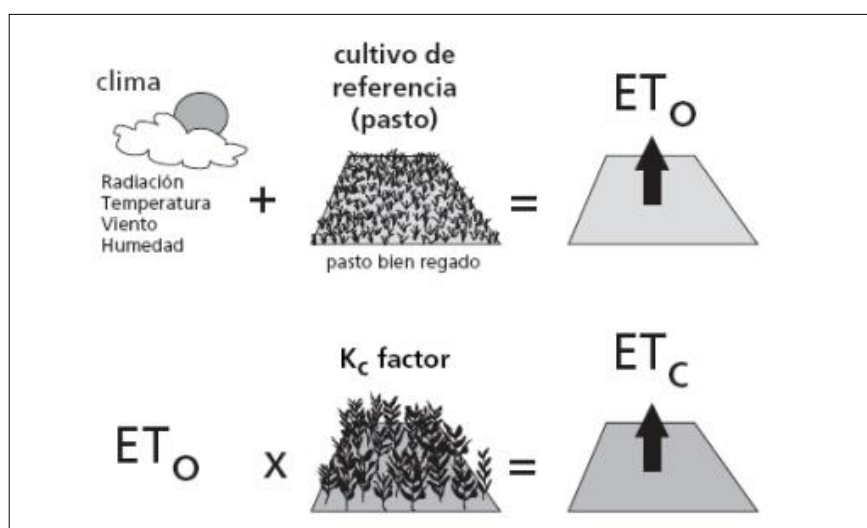


Figura 17 Proceso de obtención de la evapotranspiración.



A continuación a los valores de evapotranspiración estándar se los multiplica por un factor de corrección denominado Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ ), (Figura 18) y de esta manera obtener datos de evapotranspiración real de la cobertura actual del terreno. El  $K_c$  varía principalmente en función de las características particulares del tipo de cobertura del suelo.



**Figura 18 Cálculo de la evapotranspiración del cultivo**

Fuente:(FAO, 2006)

El factor  $K_c$  depende exclusivamente de la cobertura vegetal presente en el suelo, es así que para determinar el factor de cada uno de los puntos de la cuenca se realiza una intersección espacial entre la cobertura de uso y las estaciones meteorológicas, para de esta manera determinar el factor que le corresponde a cada una. Los factores fueron asignados de acuerdo a las tablas de valores realizadas por la (FAO, 1977) presentadas como parte de la Guía para predecir los requerimientos de agua en los cultivos (ver anexo B). En la Tabla 7 se muestran la cobertura vegetal, el  $K_c$  de cada una de las estaciones de las cuales se va a calcular los datos de evapotranspiración.

**Tabla 7**

**$K_c$  de las estaciones meteorológicas de acuerdo a la cobertura vegetal**

CÓDIGO	NOMBRE	ELEVACIÓN	COBERTURA	$K_c$ factor
M114	TUMBACO	2348	PASTIZAL	0,720000
M002	LA TOLA	2480	VEGETACIÓN ARBUSTIVA	0,760000

Continua

M024	QUITO INAMHI- INNAQUITO	2789	ÁREA POBLADA	0,100000
M022	TABACUNDO H.MOJANDA	2955	CULTIVO MAÍZ	0,750000
M023	OLMEDO-PICHINCHA	3120	PASTIZAL	0,720000
M120	COTOPAXI-CLIRSEN	3510	PLANTACIÓN FORESTAL	0,770000
M156	QUININDE	115	CULTIVO PALMA AFRICANA	0,650000
M0210	VINDOBONA	2250	CULTIVO LEGUMINOSAS	0,700000
M0214	PERUCHO INECEL	1885	FRUTALES	0,600000
M0211	LA VINNA DE CHESPI	1490	BOSQUE NATIVO	1,000000
M0046	PACHIJAL MASHPI	560	CULTIVOS VARIOS	0,650000
M0213	LA PERLA	1410	PASTIZAL	0,720000
M0118	INIAP	2758	CULTIVOS VARIOS	0,650000

Se obtuvo valores puntuales de evapotranspiración de las estaciones para cada mes en el periodo de tiempo establecido en este estudio. A partir de estos valores se procedió a calcular la media mensual multianual de evapotranspiración en cada una de las estaciones, para la época lluviosa y la época seca.

Para obtener los valores de evapotranspiración en un archivo formato raster para toda la subcuenca del río Guayllabamba, se utiliza un proceso de interpolación con el método de SPLINE, el cual se lo detalla en el ítem de interpolación de los datos de precipitación en el punto 3.5.1.

### 3.7.3 Infiltración

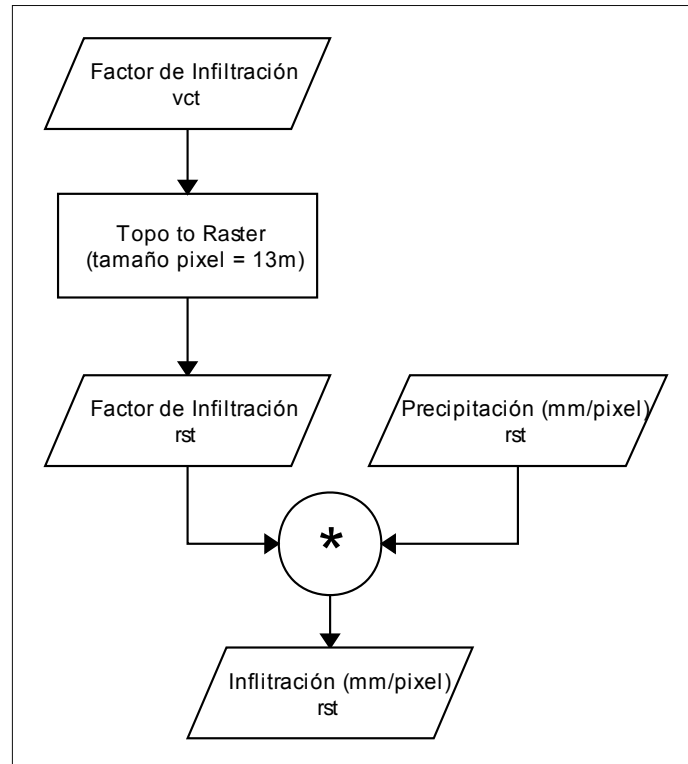
Diversos factores determinan la infiltración de un espacio geográfico específico, entre los más importantes se encuentra el contenido inicial de humedad del suelo; la textura y estructura del suelo; la cobertura vegetal de la superficie; la cantidad de materia orgánica; la temperatura del suelo y la calidad del agua aplicada (Landini, Martínez, Hugo, & Soza, 2007).

La mayoría de estas variables pueden ser incluidas dentro de modelos que predecirán la cantidad de infiltración de una zona determinada, generalmente aplicados para extensiones relativamente pequeñas, donde la obtención de datos no representa un problema. La complicación de aplicar modelos específicos a grandes extensiones es principalmente los altos costos que representa la obtención de los parámetros necesarios para que estos modelos locales funcionen. Es por eso que para extensiones grandes, donde se necesitan estimaciones no tan precisas de la cantidad de agua que se infiltra, se pueden utilizar modelos o metodologías que utilicen una u otra variable que se considere de mayor importancia para la estimación de la infiltración.

De esta manera para estudios hidrológicos estimativos en el país, instituciones como la SENAGUA utilizan un factor de infiltración basado en la estructura y textura del suelo, característico de cada tipo de suelo, y la cobertura especial de la superficie. Generado a partir de ciertas consideraciones. Por ejemplo, suelos arenosos de grano grueso tienen espacios grandes entre cada grano y permiten que el agua se infiltre rápidamente. O que a mayor cobertura vegetal existe un aumento en la porosidad del suelo, influyendo directamente en la cantidad de agua que se infiltra. Este factor de infiltración muestra el porcentaje de agua que se infiltra en relación al agua total presente en el suelo, principalmente relacionado a la cantidad de agua que precipita en cada zona.

Este archivo fue parte de los productos a entregar por la consultoría realizada por SENAGUA con el Instituto de Estudios Planificación Diseño e Investigación de Changjiang(CISPDR, 2015) dentro del proyecto nombrado Planificación Hídrica Nacional del Ecuador (2015-2035).

Para determinar la infiltración en la subcuenca del río Guayllabamba se multiplica la precipitación por el factor de infiltración de la misma área. El coeficiente de infiltración se obtiene al rasterizar el archivo vectorial entregado por SENAGUA. En la **Figura 19** se detalla el proceso de la obtención del parámetro de la infiltración.



**Figura 19** Proceso para el cálculo de la infiltración.

### 3.8 Cálculo del caudal de escorrentía

Para determinar el volumen de agua neto de la cuenca se utiliza la ecuación del balance hídrico, propuesta al inicio de este capítulo, la misma que relaciona precipitación, evapotranspiración e infiltración. De cada uno de estos parámetros se obtuvo un archivo formato raster con los valores de las distintas variables para cada punto de la subcuenca del río Guayllabamba.

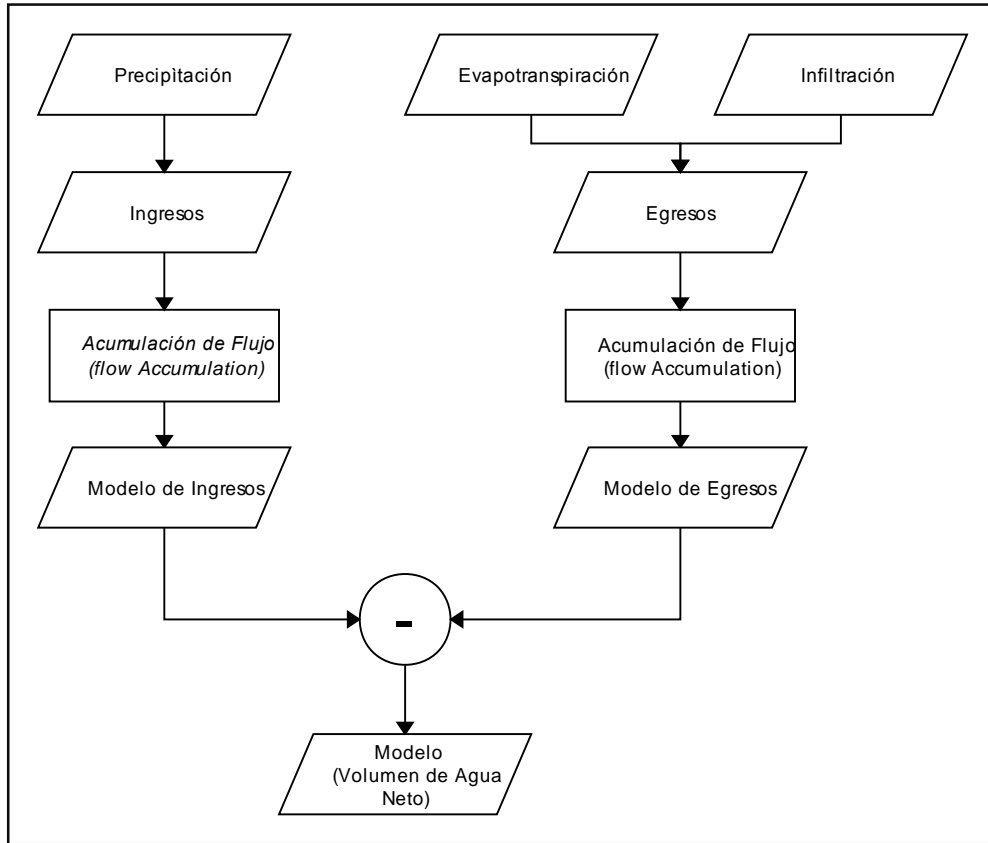
Posteriormente se agrupó las variables mencionadas en ingresos (precipitación) y egresos (evapotranspiración e infiltración), de acuerdo a la ecuación del balance hídrico, para evitar la reclasificación de los valores negativos, que se pueden presentar al momento de utilizar las herramientas geoinformáticas para la modelación hídrica.

Mediante la utilización del MDE se realizó varios procesos de modelación hídrica que se encuentran en la extensión *Hydrology* del software

ArcGIS versión 10.0. El primer paso es rellenar las posibles imperfecciones existentes en la superficie del modelo digital de elevaciones, de tal forma que las celdas en depresión alcancen el nivel del terreno de alrededor mediante la herramienta *FillSinks*.

A partir del MDE corregido se genera un archivo raster que indique la dirección del flujo, dirección del descenso más empinado, o la caída máxima, desde cada celda en base a los valores de elevación, mediante la herramienta *Flowdirection*.

A continuación se generan dos archivos de acumulación de flujo, uno con los ingresos y otro con los egresos del balance hídrico, realizados en base al número de celdas que fluyen hacia cada celda. Los píxeles de salida con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y a partir de ellas se identifica los cauces de los ríos. La herramienta *Flowaccumulation* permite introducir una capa de “pesos”, para dar valores reales de volumen de agua neto a cada píxel y de esta manera modelar el flujo correspondiente hacia cada cauce. De esta manera se obtiene el caudal de escorrentía de los ingresos y egresos de los cauces de la subcuenca. Para posteriormente restarlos y obtener el modelo que indica el caudal de escorrentía modelado. (ver **Figura 20** **Proceso para la determinación del modelo de agua neto**), donde se muestra el diagrama de los procesos para la determinación del modelo de agua neto.



**Figura 20**Procesopara la determinación del modelo de agua neto

### 3.9 Calibración del modelo

El proceso de calibración consiste en implementar ajustes finales al modelo, con información extra de buena calidad que no se haya tomado en cuenta en los cálculos preliminares de obtención del modelo, con la finalidad de que los resultados se aproximen lo más posible a la realidad.

Este proceso de calibración adquiere un papel de vital importancia sobre la calidad y confiabilidad del modelo generado, debido a que busca reducir las deficiencias que este presenta, en parte porque en el proceso de obtención del mismo se descartaron las variables de caudal de deshielo y la de captaciones de agua, mencionadas en la metodología propuesta por Coello(2007), al carecer de información documentada y para evitar datos anómalos provenientes de estas variables.

Primero se extrae los valores dados por el modelo obtenido previamente de cada una de las estaciones hidrológicas destinadas para la calibración que se encuentran en el área de estudio, para posteriormente realizar una sustracción entre los valores reales y los del modelo, y de esta manera determinar la diferencia de caudal en estos puntos. A partir de estos datos se realiza una interpolación que abarque toda la subcuenca del río Guayllabamba, y finalmente se realiza el proceso de acumulación de flujo para obtener el factor de calibración de caudal que se debe sumar al modelo ver **Figura 21 Diagrama de procesos para la calibración del modelo**, donde se muestra el diagrama de procesos para la calibración del modelo.

El factor de calibración es un archivo formato raster que tiene valores para cada pixel dentro de la cuenca. Debido a que solo se requiere calibrar los caudales de los cauces, se multiplica este archivo por una máscara la cual permite que los valores de corrección se mantengan en los cauces, y asignar el valor de 0 a los demás pixeles.

Finalmente se suma el factor de calibración, al modelo hidrológico obtenido previamente, y de esta forma se consigue un modelo calibrado, en el cual se puede obtener valores de escorrentía de cualquier cauce dentro de la subcuenca del río Guayllabamba.

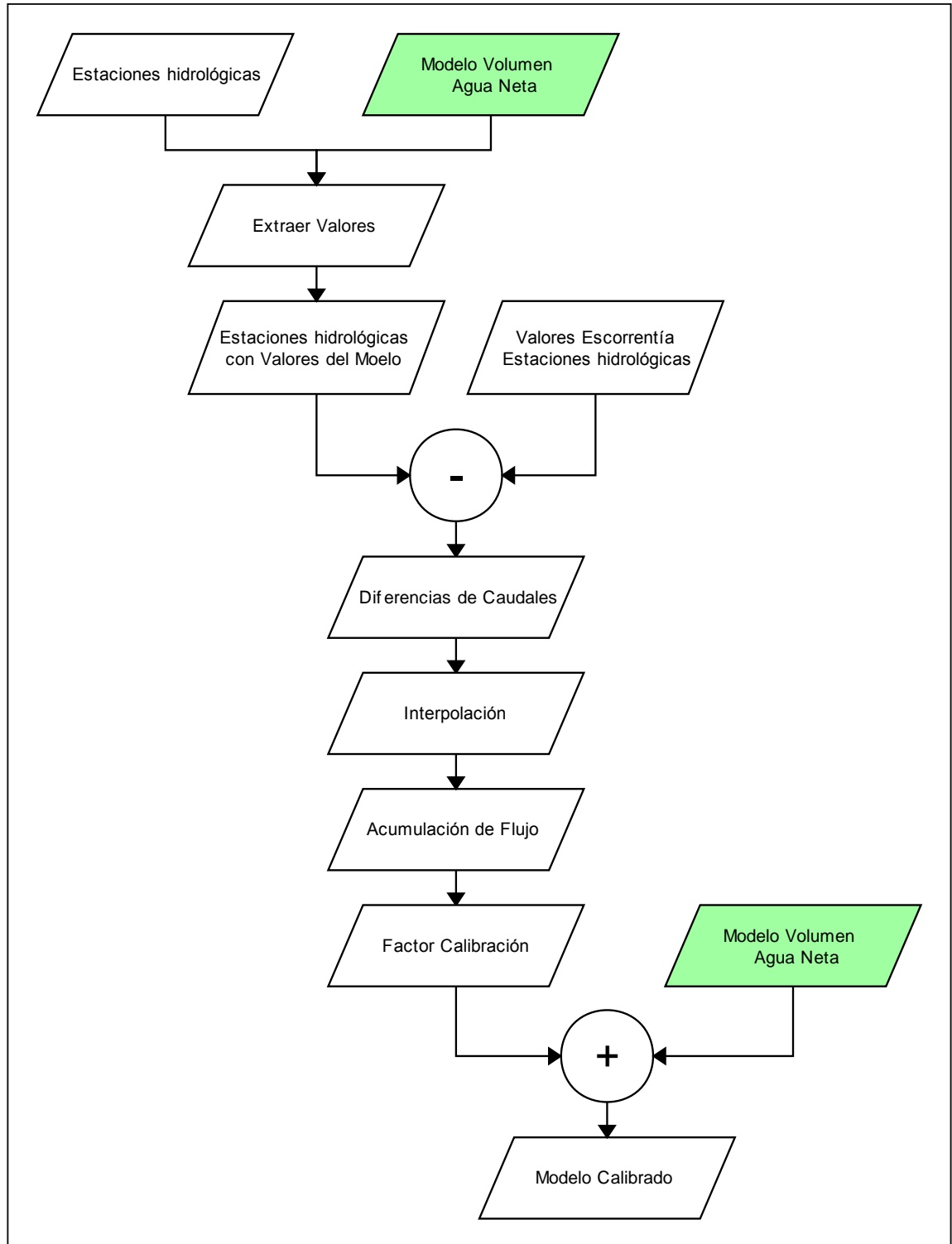


Figura 21 Diagrama de procesos para la calibración del modelo

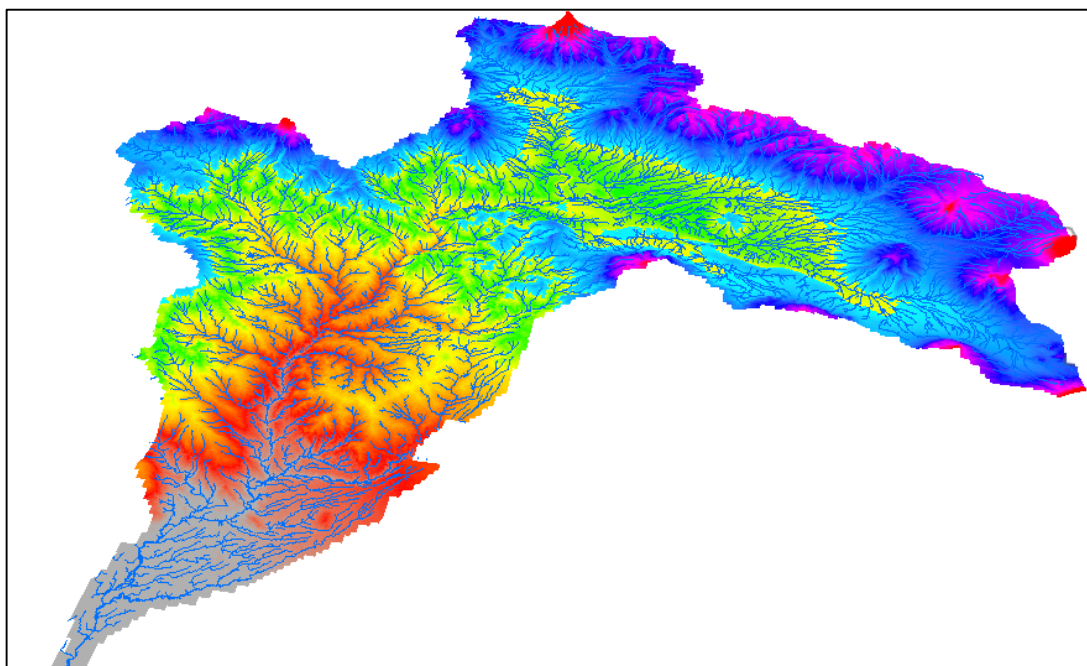


## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Análisis del modelo obtenido.

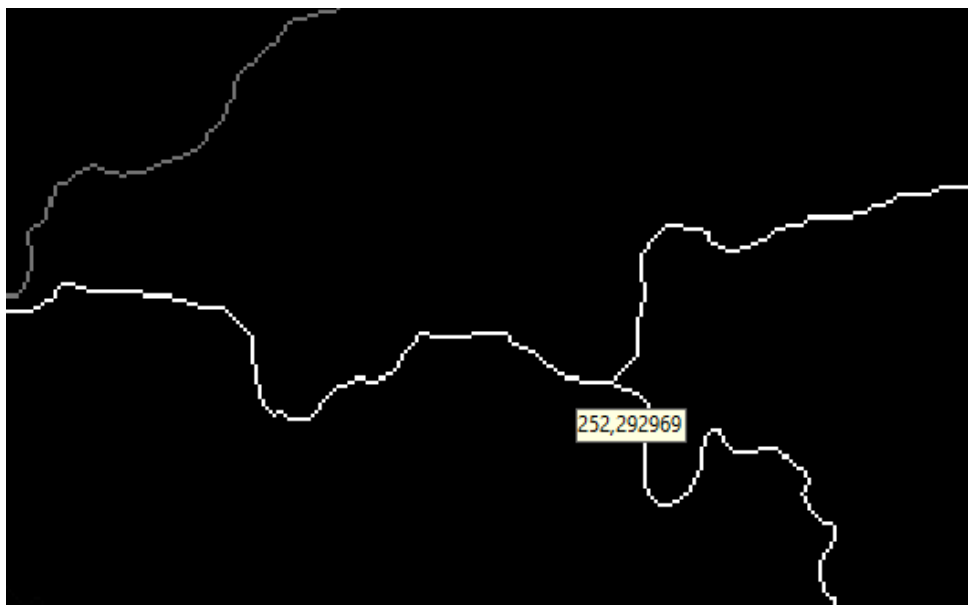
El modelo de estimación de la oferta hídrica de la subcuenca del río Guayllabamba se lo obtuvo para la época lluviosa y para la época seca, en archivos formato raster; en donde, cada píxel representa un área de 169 m<sup>2</sup> que muestra el caudal en m<sup>3</sup>/s que el río tiene en esa sección. De esta manera, los píxeles con valores de caudal más altos, corresponden a los ríos de primer orden ubicados en las partes más bajas de la cuenca, mientras que los que presentan valores de píxel menores pertenecen a los afluentes que se encuentran en las partes más altas. En la **Figura 22 Modelo de oferta hídrica** se muestra el modelo resultante.



**Figura 22 Modelo de oferta hídrica**

El modelo puede visualizarse en cualquier software que admita entrada de archivos formato raster. En este estudio el software utilizado fue ArcGIS versión 10.0. Activando la opción “Show MapTips” en la pestaña “Display” de

las propiedades del raster, se visualiza el caudal del píxel en donde el puntero del ratón se ubique (ver **Figura 23 Visualización de datos en el modelo de oferta hídrica**). También se pueden extraer del modelo valores específicos de interés con la herramienta *extracvalues*, en donde la información de entrada requerida se constituye del modelo y de la cobertura de puntos de donde se requiera conocer el caudal.



**Figura 23 Visualización de datos en el modelo de oferta hídrica**

A partir de los resultados obtenidos del modelo se realizaron dos mapas en los cuales se puede apreciar los caudales de los cauces principales de la subcuenca del río Guayllabamba para las dos épocas como se puede apreciar en la **Figura 24** y en la **Figura 25**. De igual manera esta información se amplía en el anexo A3 y A4, que corresponden a los mapas del modelo de oferta hídrica para la época seca y para la lluviosa.

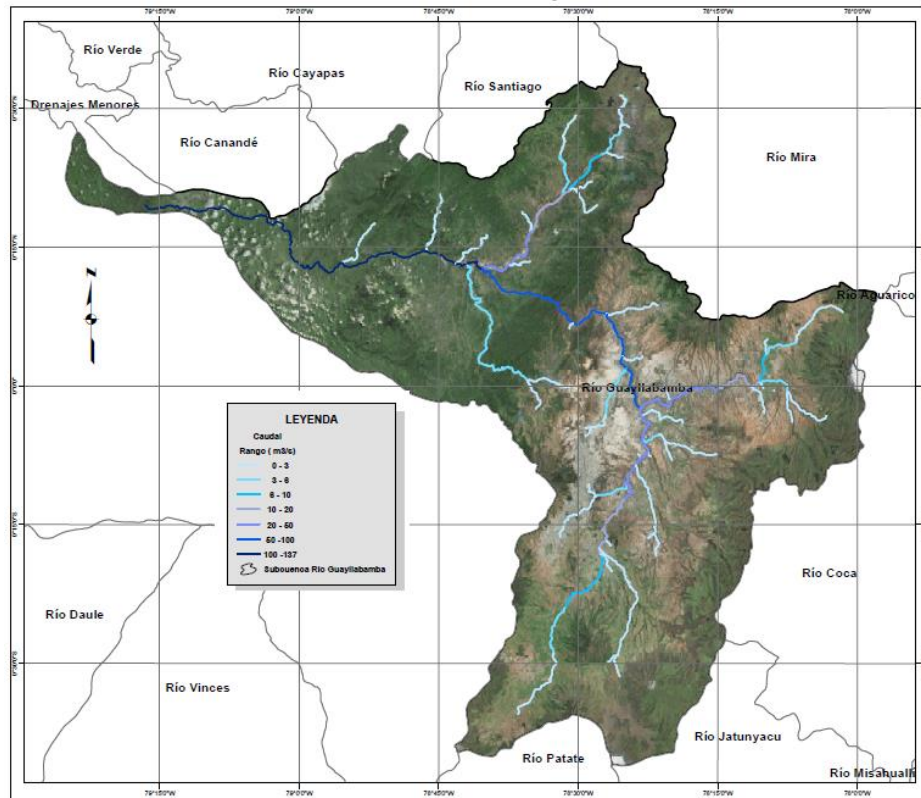


Figura 24 Representación del modelo para la época seca

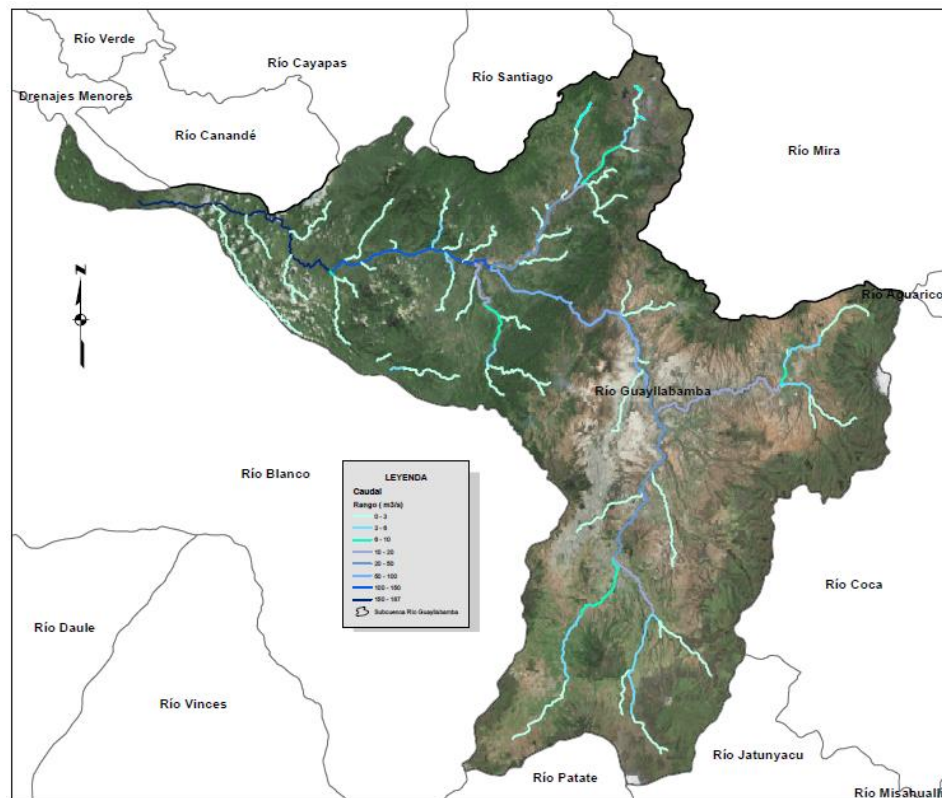
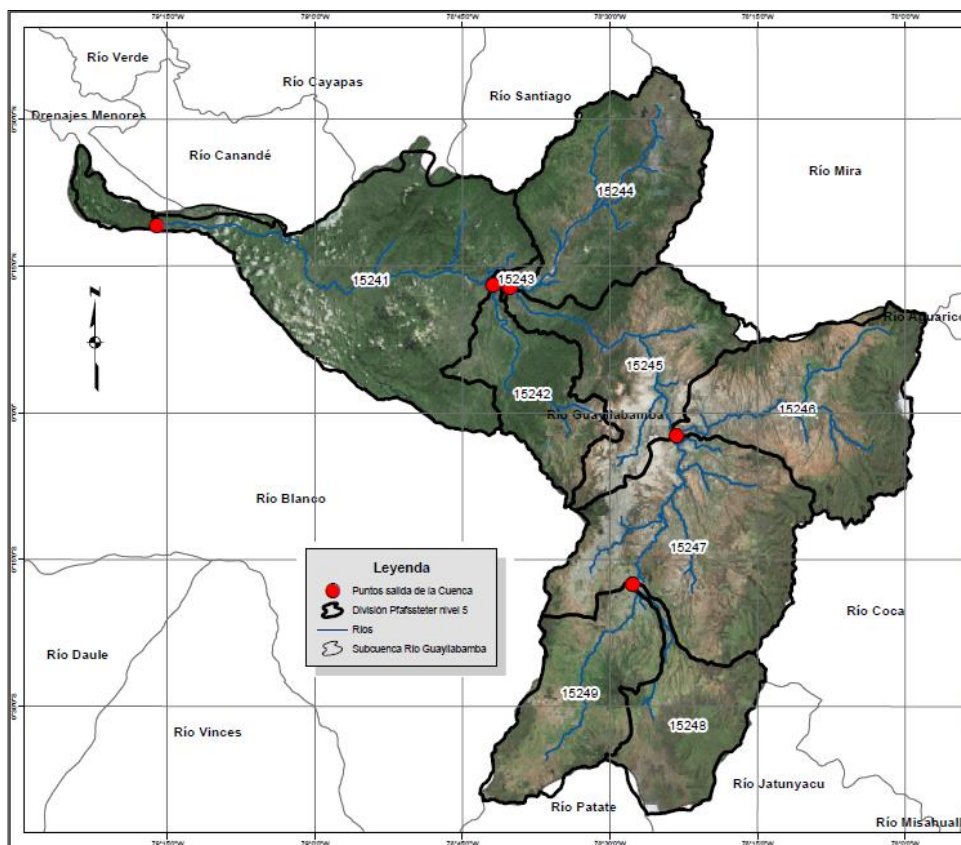


Figura 25 Representación del modelo para la época lluviosa

Los resultados extraídos del modelo se presentan individualizados para las nueve unidades hidrográficas nivel 5 que se encuentran dentro de la subcuenca del río Guayllabamba. En la **Figura 26** se muestran los puntos de salida donde se extrajeron los valores descritos en la Tabla 8, donde se puede apreciar el valor de caudal que cada unidad hidrográfica tiene en su punto de salida. (Anexo A2. Mapa de Puntos de salidas de las unidades hidrográficas).

**Tabla 8**  
**Caudal en el punto de salida de cada unidad hidrográfica**

CÓDIGO PFAFSTETTER	NOMBRE DE LA U. HIDROGRÁFICA	MODELO ÉPOCA LLUVIOSA (m <sup>3</sup> /s)	MODELO ÉPOCA SECA (m <sup>3</sup> /s)
15249	RÍO SAN PEDRO	9,56	5,96
15246	RIO PISQUE	18,83	19,53
15244	RIO INTAG	32,63	22,14
15243	QUEBRADA SAN ANDRÉS	103,99	74,23
15248	RIO PITA	12,05	0,80
15247	GUAYLLABAMBA ALTO	31,44	18,63
15245	GUAYLLABAMBA MEDIO	70,31	51,62
15242	RIO ALAMBÍ	15,50	3,89
15241	GUAYLLABAMBA BAJO	174,64	88,61



**Figura26 Puntos de salida de las unidades hidrográficas**

El modelo que se presenta en este estudio cubre el 96 % de la subcuenca del río Guayllabamba, lo que se consideraría como un buen indicador. Sin embargo a pesar que casi la totalidad de la subcuenca está representada por el modelo, es importante mencionar que en la sección no cubierta se encuentra el punto de salida de la subcuenca, por lo que los resultados de caudal de salida de esta, se los toma en un punto localizado sobre el cauce del río Guayllabamba, 10 Km aguas arriba de su ubicación real.

El caudal de desfogue de la subcuenca del río Guayllabamba representado por el modelo es de  $174,64 \text{ m}^3/\text{s}$  en la época lluviosa y de  $88,61 \text{ m}^3/\text{s}$  para la época seca, valores que corresponden al caudal que presenta el modelo en su parte más baja sobre el cauce del río Guayllabamba, localizado en la parte noroccidental de la subcuenca, a 20 km de la intersección con el río Blanco.

Como se puede observar en la tabla de manera general existe un 57 % más de caudal en la época lluviosa que en la época seca, a excepción de la cuenca del río Pisque, en donde los caudales tanto para la época seca como para la época lluviosa se mantienen en el mismo rango, probablemente porque las condiciones climáticas de esta sección de la subcuenca del Guayllabamba hacen que exista un balance entre los ingresos y los egresos durante todo el año, es decir que la evapotranspiración que es uno de los factores que se utiliza en el modelo, a diferencia del resto de la subcuenca, en este lugar presenta una relación directamente proporcional con la precipitación, manteniendo así un caudal constante a pesar que exista una menor precipitación en los meses que dura la época seca.

El valor más bajo que presenta el modelo se encuentra en el punto de salida de la cuenca del río Pita para la época seca que es de  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor que se puede contrastar con modelos realizados específicamente para determinar la oferta hídrica de la cuenca del Río Pita (Pérez, 2007), que presentan valores medios mensuales multianuales para época seca que oscilan entre  $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por lo que se evidencia que afirmativamente el caudal del río Pita en esta época desciende hasta estos valores.

## **4.2 Validación del modelo**

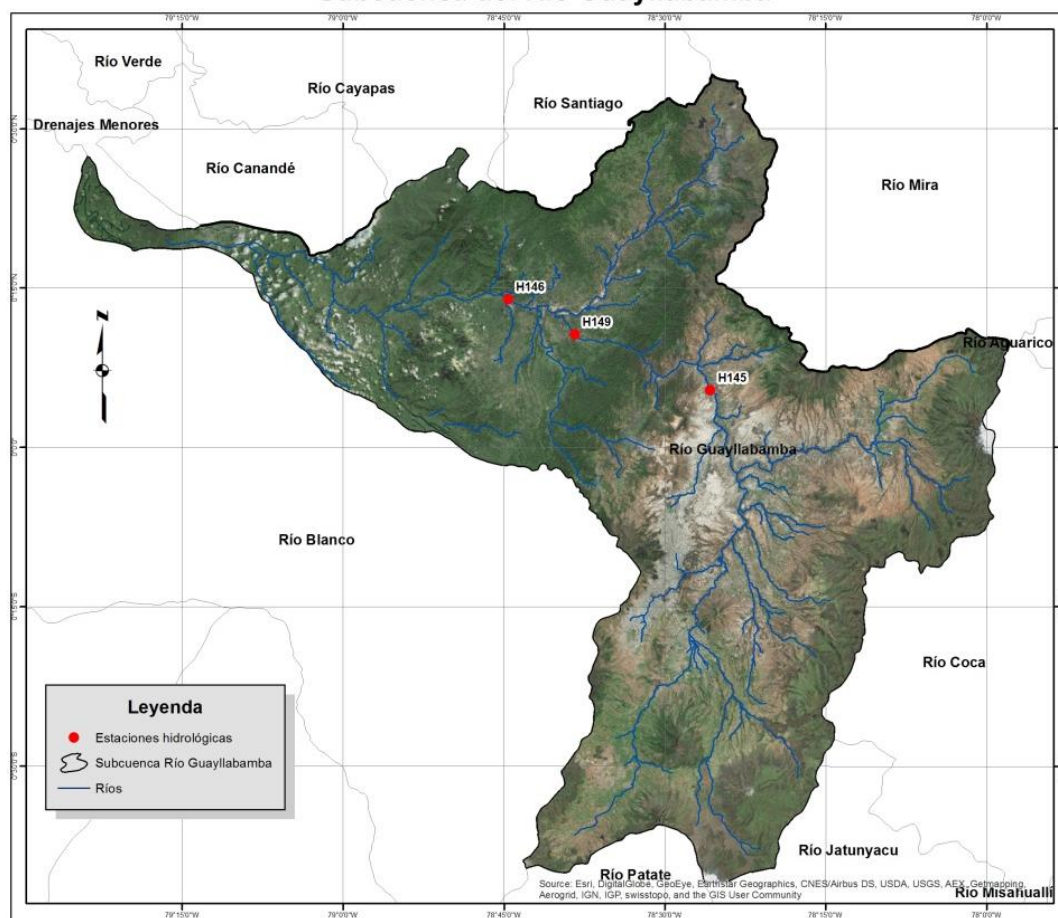
### **4.2.1 Validación con datos reales**

El objetivo de la validación en este caso es comprobar cuanto se acercan los valores calculados por el modelo a la realidad, para lo cual se utiliza datos de caudal medidos por las estaciones hidrológicas que se encuentran al interior de la subcuenca. La validación del modelo es importante debido a que es la única manera de saber en qué tipo de trabajos pueden ser utilizados los datos que se obtienen del modelo, uno de los principios de la geoestadística establece que no se debe hacer predicciones sin evaluar las incertidumbres del modelo, en otras palabras ningún modelo está completo si no se lo compara con información extra (Mendoza, 2011).

De las nueve estaciones hidrológicas ubicadas dentro de la zona de estudio, de las cuales se tienen registros históricos de caudales medios mensuales, se utilizó 3, cuya ubicación permite cubrir la mayor parte de la cuenca, debido a que se encuentran en diferentes tramos del cauce principal. Es importante mencionar que estas estaciones no fueron utilizadas con anterioridad en ninguno de los procesos que se llevaron a cabo para la generación del modelo. Las estaciones utilizadas para la validación se pueden encontrar en la Tabla 9. Y su distribución se puede ver en la **Figura 27 Estaciones utilizadas para la valoración**

**Tabla 9**  
**Estaciones Hidrológicas Utilizadas en la Validación**

CÓDIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	TIPO	ELEVACIÓN	LONGITUD	LATITUD	PROVINCIA
H145	GUAYLLABAMBA AJ CUBI	LG	1540	78G 25' 40" W	0G 5' 35" N	PICHINCHA
H149	GUAYLLABAMBA EN PTE.CHACAPATA	LM	860	78G 38' 17" W	0G 10' 50" N	IMBABURA
H146	GUAYLLABAMBA DJ ALAMBI	LM	625	78G 44' 30" W	0G 14' 10" N	IMBABURA



**Figura 27 Estaciones utilizadas para la valoración**

A partir de los datos medios mensuales de caudal de las estaciones hidrológicas, se calculan los valores medios mensuales multianuales de cada una de ellas, tanto para la época seca, como para la época lluviosa, los valores se muestran en la Tabla 10

**Tabla 10**  
**Valores medios multianuales para la época lluviosa y para la seca**

COD ESTACIÓN	ÉPOCA	CAUDAL REAL (m <sup>3</sup> /s)
H145	Lluviosa	48,99
H145	seca	37,39
H146	Lluviosa	145,72
H146	seca	102,09
H149	Lluviosa	58,73
H149	seca	46,59



Para realizar la comparación entre los valores de caudal del modelo y los datos promedios multianuales medidos por las estaciones hidrológicas se optó por utilizar el error medio absoluto normalizado (NMAE), estadístico que permite medir la precisión del modelo, y se lo define mediante la Ecuación 21 (Tompkins, 2011, citado en Stauffer y Seaman, 1990).

$$NMAE = \sum_{i=1}^N \frac{|X - X_i|}{\frac{X_i}{N}} \quad \text{Ecuación 21}$$

El error medio absoluto normalizado (NMAE) es la media de los errores en valor absoluto de las predicciones calculadas (X) respecto de las medidas de caudal real ( $X_i$ ), N es el número de puntos utilizados. Se normaliza con el caudal observado o real con el fin de poder comparar el error del modelo independientemente de que tan diferentes sean los caudales en toda la extensión de la subcuenca. De este modo, el error absoluto normalizado tendrá un valor entre 0 y 1. Donde los valores pequeños o cercanos a cero indican que el modelo presenta pocos errores.

Para tener una visión más cualitativa de la validación del modelo, además del NMAE se calcula el error medio de la diferencia entre el caudal real y el caudal calculado, el valor máximo, el valor mínimo y la desviación estándar (SD) en  $m^3/s$ . En la Tabla 11 se muestran los resultados de las diferencias y los parámetros estadísticos.

**Tabla 11**  
**Resultados de la validación**

COD ESTACIÓN	ÉPOCA	CAUDAL REAL(m <sup>3</sup> /s) (Xi)	CAUDAL CALCULADO (m <sup>3</sup> /s) (X)	DIFERENCIA ABSOLUTA  X-Xi	$\frac{ X-Xi }{\frac{Xi}{N}}$
H145	Lluviosa	48,99	56,16	7,17	0,0244
H145	seca	37,39	47,27	9,88	0,0440
H146	Lluviosa	145,72	123,26	22,46	0,0257
H146	seca	102,09	80,16	21,93	0,0358
H149	Lluviosa	58,73	69,21	10,48	0,0297
H149	seca	46,59	51,33	4,74	0,0170
<b>Media</b>				12,78	
<b>Min</b>				4,74	
<b>Max</b>				22,46	
<b>SD</b>				7,58	
<b>NMAE</b>				0,1766	

Al analizar los resultados cualitativos de la validación se puede evidenciar que el error medio del modelo es de 12 m<sup>3</sup>/s con una desviación estándar de 7,58 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo de acuerdo a la tabla anterior el error medio absoluto normalizado (NMAE) es de 0,1766, lo cual indica que el modelo presenta ciertos errores, pero que de manera general se acerca a la realidad.

Se debe tomar en cuenta que existe cierta variabilidad entre las diferencias absolutas de las estaciones utilizadas en la validación, siendo la mínima de 4,74 m<sup>3</sup>/s y la máxima de 22,46 m<sup>3</sup>/s, variabilidad que se reduce al normalizar los errores mediante la aplicación de un estadístico como el NMAE. A pesar de ello se debe mencionar las similitudes entre dos de las tres estaciones, la GuayllabambaCubi (H145), y la Guayllabamba en el puente Chacapata (H149), los valores de caudal en las dos épocas del año se reproducen bien con el modelo. Los valores absolutos calculados son mayores a los medidos, y la diferencia se lo puede adjudicar a factores externos que no fueron analizados en el modelo como por ejemplo, el ingreso de caudales de retorno por riego ineficiente provenientes de canales. Al tomar en consideración la ubicación de estas dos estaciones y al comportamiento progresivo del modelo se puede estimar que estas mismas

características se presentan en el 80% de la superficie de la subcuenca del río Guayllabamba.

De acuerdo al modelo realizado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) denominado “Manejo Integrado de la Hoya de Quito” A medida que se va descendiendo en altitud las diferencias entre los caudales naturales calculados y los medidos tienden a incrementar, debido al cambio brusco en las condiciones geográficas y climáticas en esta zona. Es así que para el modelo desarrollado en el presente estudio, en la estación Guayllabamba-Alambí, las diferencias entre los caudales observados y los calculados, varían alrededor de 20 m<sup>3</sup>/s, dependiendo de la época. Por lo que a pesar que el estadístico de validación se generalizó para todo el modelo, los datos obtenidos en cotas inferiores a 625 metros, correspondientes a dicha estación, son los que menor certeza presenten.

En base a los puntos indicados, se puede decir que los resultados del modelo hidrológico propuesto, son una estimación de la oferta hídrica que, en función de la información disponible, pretende una aproximación lo más cercana a la realidad.

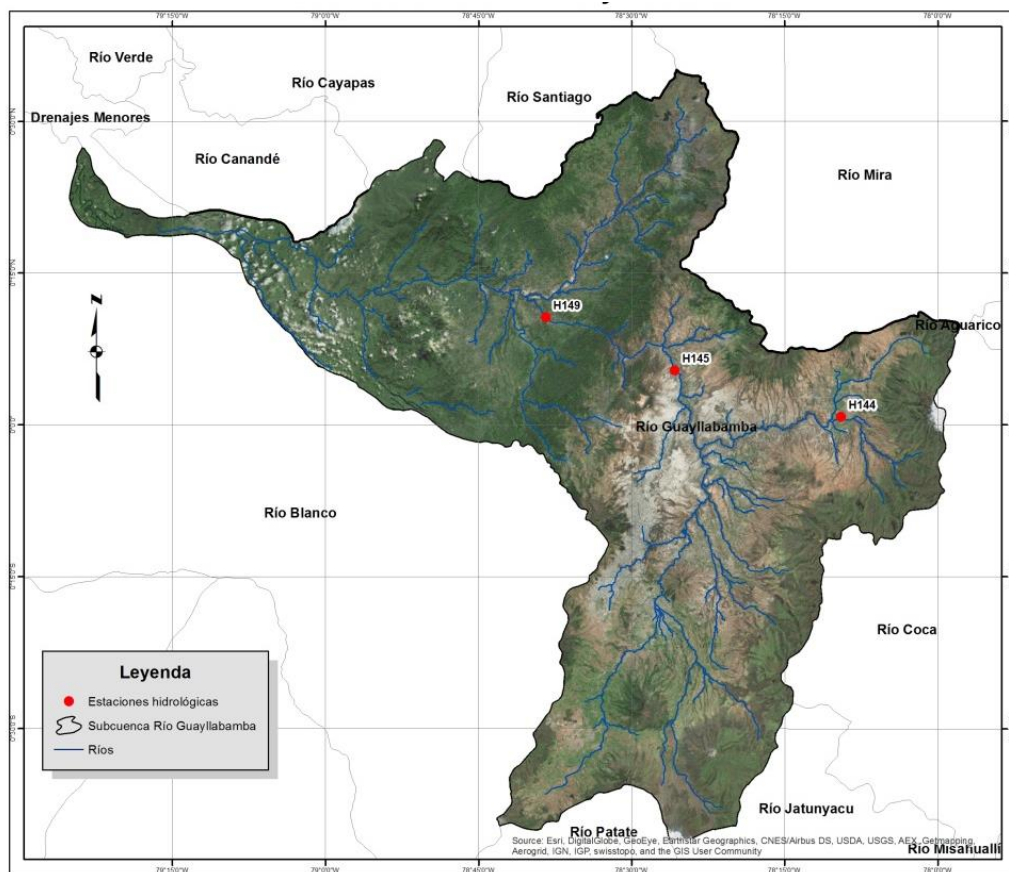
#### **4.2.2 Comparación con otros modelos**

Para este proceso se toma en cuenta el modelo realizado en el 2008 a cargo de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) denominado “Manejo Integrado de la Hoya de Quito” cuyo objetivo fue desarrollar un modelo que permita la estimación de los caudales medidos y con un 80% de excedencia en el tiempo, para cuantificar la oferta natural en cualquier punto de la red hidrográfica de la Hoya de Quito, basado en información secundaria disponible (UICN, 2008).

De esta manera se cuenta con una importante fuente de comparación, debido a que en los dos modelos se estima el mismo parámetro, caudal de escorrentía, de una zona en común, con la consideración que a diferencia del modelo propuesto en el presente estudio, el desarrollado por la UICN introduce valores estimativos tanto de caudal de deshielo aportado por los glaciares, así como de captaciones y trasvases que se encuentran en el

interior de la subcuenca del río Guayllabamba, lo que representó un importante trabajo de campo.

Para realizar la comparación entre los valores de caudal del modelo propuesto en este estudio y los valores del realizado por la UICN se determinó que los puntos de comparación van a ser tres, correspondientes a la ubicación de tres estaciones hidrológicas ubicadas en la zona en común (H144, H145, H149)(ver **Figura 28 Estaciones utilizadas para la valoración modelo UICN.**). El modelo presentado por la UICN proporciona valores mensuales de caudal, por lo que se agrupó dichos valores en dos épocas de acuerdo a la metodología presentada en este estudio. En la Tabla 12 se muestran los valores mensuales del modelo UICN.



**Figura 28 Estaciones utilizadas para la valoración modelo UICN.**

**Tabla 12**  
**Valores Mensuales de Q medio del Modelo elaborado por la UICN**

COD	Q <sub>medio</sub> (m <sup>3</sup> /s)											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
H144	5,50	6,20	6,20	7,40	7,80	8,30	8,10	7,30	6,50	6,00	6,20	5,70
H145	71,80	85,20	92,30	102,60	85,90	63,00	44,60	37,80	52,90	69,70	78,00	73,20
H149	78,80	93,00	100,50	112,10	93,00	66,40	46,40	39,10	55,60	74,00	84,20	79,50

Una vez calculados dichos valores, se realiza la comparación con los obtenidos en modelo propuesto en este estudio. En Tabla 13 se presentan los promedios de cada una de las épocas del modelo UICN, los valores de caudal de escorrentía obtenidos del presente modelo, las diferencias absolutas, el máximo el mínimo y la desviación estándar. Además del error medio absoluto normalizado (NMAE).

**Tabla 13**  
**Resultados de comparación**

COD ESTACIÓN	ÉPOCA	CAUDAL MODELO UICN(m <sup>3</sup> /s) (Xi)	CAUDAL CALCULADO(m <sup>3</sup> /s) (X)	DIFERENCIA ABSOLUTA  X-Xi	$\frac{ X-Xi }{Xi}$ N
H144	Lluviosa	6,39	5,22	1,17	0,0305
H144	seca	7,90	3,47	4,43	0,0935
H145	Lluviosa	79,07	56,16	22,91	0,0483
H145	seca	48,47	47,27	1,20	0,0041
H149	Lluviosa	85,63	69,21	16,42	0,0320
H149	seca	50,63	51,33	0,70	0,0023
<b>Media</b>				7,81	
<b>Min</b>				0,70	
<b>Max</b>				22,91	
<b>SD</b>				9,51	
<b>NMAE</b>				0,2107	

De la tabla anterior se extrae que el error medio entre el modelo desarrollado por la UICN y el propuesto en este estudio es de 7,81 m<sup>3</sup>/s, con una desviación estándar de 9,51 m<sup>3</sup>/s, y un error medio absoluto (NMAE) de

0,2107. A partir de estos valores se puede afirmar de manera general que existen diferencias más o menos significativas entre los dos modelos. Sin embargo se nota que existe concordancia entre los valores de caudal de escorrentía, lo que se considera un indicador más de que el comportamiento del modelo desarrollado en este estudio se apega a la realidad.

Hay que tomar en cuenta que si bien es cierto los dos modelos comparten una base conceptual común, los datos de entrada no fueron los mismos, o no fueron tratados de la misma manera, las metodologías presentan diferencias esenciales al momento de utilizar y combinar las variables que ingresan en el balance hídrico para determinar el caudal de escorrentía, y así mismo los procesos de calibración y validación son distintos. Características que justifican de alguna manera el error medio absoluto que existe entre las diferencias de ambos modelos.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- El modelo hidrológico para los caudales medios mensuales que se presenta está basado en la información hidrometeorológica disponible en la subcuenca del río Guayllabamba, así como en la morfología del terreno, la capacidad de infiltración, el uso y la cobertura del suelo. Con lo que se pretende una aproximación lo más cercana a la realidad.
- La subcuenca del río Guayllabamba presenta de forma global una oferta hídrica media anual de 131,63 m<sup>3</sup>/s, producto de una evapotranspiración media de 523 mm/año y de una precipitación media de 1040 mm/año.
- Se utilizaron datos históricos de 35 estaciones meteorológicas y 9 hidrológicas, en el periodo comprendido entre los años de 1978 a 2010, lo que da un total de 44 estaciones ubicadas en la subcuenca del río Guayllabamba, estas series fueron sometidas a procesos de relleno y a análisis de doble masa para determinar su validez, con lo que se garantiza que los datos de las estaciones meteorológicas e hidrológicas consideradas en el modelo son homogéneos y válidos.
- De acuerdo al comportamiento de los datos de precipitación de las estaciones seleccionadas en el periodo de tiempo determinado, se puede extraer que existen dos épocas diferentes. La época lluviosa que va desde septiembre a mayo, con un caudal medio anual de 174,64 m<sup>3</sup>/s y la época seca, que comprende los meses de junio, julio y agosto con un caudal medio anual de 88,61 m<sup>3</sup>/s.
- Las nueve unidades hidrográficas correspondientes al nivel 5 de acuerdo a la división Pfafstetter, que se encuentran en el interior de la subcuenca del río Guayllabamba presentan gran variabilidad de acuerdo a los caudales de salida de cada una. Las cuencas del Guayllabamba Bajo,

Quebrada de San Andrés y Guayllabamba Medio, en este orden, son las que mayor cantidad de agua presentan en su punto de salida.

- Al igual que todo modelo hidrológico, este contiene incertidumbres debido a la existencia o no de la información requerida y las propias del procedimiento utilizado. Al realizar el proceso de validación con datos históricos de caudales de escorrentía observados se concluye de forma general, que los resultados obtenidos para el presente permiten conocer el comportamiento del agua en la cuenca, el cual se aproxima bastante a la realidad.
- El modelo de la oferta hídrica responde bastante bien a la hipótesis sobre la cual fue generado, es decir que el caudal de escorrentía, básicamente se puede modelar utilizando tres variables macro, la precipitación, la infiltración del suelo y la evapotranspiración. Para posteriormente calibrarlo con datos de escorrentía observados y lograr generar modelos que tengan la misma confiabilidad de otros que incluyan más variables en su obtención. Esto se puede afirmar por las similitudes en los datos que el modelo presenta con otros más elaborados y que han utilizado trabajo de campo para la obtención de variables adicionales.

## **5.2 Recomendaciones**

- Al verificar que el modelo propuesto tiene un buen ajuste y tomando en cuenta que utiliza menos datos de entrada que la mayoría de metodologías existentes, se recomienda utilizar esta metodología en lugares donde no se cuente con información de variables externas y se requiera conocer de manera general el comportamiento de la oferta hídrica en la cuenca.
- Si lo que se desea es obtener modelos más cercanos a la realidad, se recomienda utilizar la información que próximamente va a estar disponible, como es la depuración del Banco Nacional de Autorizaciones, lo cual daría un mayor ajuste a los modelos generados debido a que se podría introducir la variable de captaciones de agua.



- Un factor que no es considerado en la mayoría de modelos es el porcentaje del agua infiltrada que vuelve a la misma cuenca y la que debido a la infiltración profunda no lo hace, así mismo la velocidad con la que la precipitación se transforma en caudal, que está relacionada con la capacidad de regulación de la cuenca a través de almacenamiento de agua en diferentes formas también necesita mayor atención, un análisis de estos dos parámetros pueden mejorar el ajuste de los modelos.
- Debido a que el modelo se desarrolló con datos promedios mensuales, no está diseñado para calcular caudales con menor probabilidad de excedencia, es decir caudales de crecida o de extrema sequía, por lo que no se recomienda su utilización en estas circunstancias.
- De acuerdo a la revisión de la literatura y los resultados expuestos en este modelo se considera que a medida que se va descendiendo en altitud las diferencias entre los caudales naturales calculados y los medidos tienden a incrementar. Por lo que a pesar que el estadístico de validación se generalizó para todo el modelo, se recomienda tomar en cuenta esta consideración para los datos que se obtengan en cotas inferiores a 625 metros.

## BIBLIOGRAFÍA

- Benayas, R. (2014). *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Hidrológica*. Valencia: SMAGUA.
- Benhamrouche, A., & Martín, J. (2012). *Avances metodológicos en el análisis de la concentración diaria de la precipitación en la España peninsular*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Burgos, V., & Salcedo, A. P. (2012). *Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información*. Recuperado el 13 de enero de 2016, de Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino: <http://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.10.pdf>
- CEA. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 5 de diciembre de 2015, de Confederación de Empresarios de Andalucía: <http://sig.cea.es>
- CEPAL. (2012). *Diagnóstico de las estadísticas del agua en Ecuador*. Recuperado el 12 de enero de 2016, de <http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/.pdf>
- CISPDR. (2015). *Planificación Hídrica Nacional del Ecuador*. Quito.
- Coello, X. (2007). *Estudio Hidrológico para Evaluación del Balance Hídrico y Caudal Ecológico de las Cuencas de los Ríos Pita y San*. Quito.
- Comisión Nacional del Agua. (2010). *Manual Teórico Práctico del Observador Meteorológico de Superficie*. Recuperado el 15 de enero de 2016, de <http://smn.cna.gob.mx/observatorios/ManualObservador.pdf>
- De bievre, D., & Coello, X. (2008). *Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en la Hoya de Quito*. Quito.
- ESRI. (2015). *Spline*. Recuperado el 3 de enero de 2016, de ArcGIS Desktop: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/spline.htm>
- ESRI. (2014). *Tamaños de Celda Para Archivos Tipo Rasters*. Recuperado el 15 de enero de 2016, de Recursos ArcGIS: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/>

- FAO. (2006). *Cálculo de Evapotranspiración*. Recuperado el 5 de enero de 2016, de <http://www.fao.org>
- FAO. (2000). *Evapotraspiración del Cultivo*. Italia: FIAT PANIS.
- FAO. (1977). *Guía Para Predecir los Requerimientos en el Crecimiento de Cultivos*. Roma.
- FAO. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal*. Roma: Deposito de documentos de la FAO.
- Fundación Gonzalo Río Arronte. (2004). *Agua Propiedades Físicas*. Obtenido de AGUA.org: <https://www.agua.org.mx//propiedadefisicas>
- IGN. (2015). *Cartografía y Bases Geográficas*. Recuperado el 6 de noviembre de 2015, de Instituto Geográfico Nacional: <http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesBDGintro.do>
- INAMHI. (2010). *Anuarios Hidrológicos*. Quito.
- INAMHI. (2010). *Anuarios Metereológicos*. Quito.
- INAMHI. (2013). *Cambio Climático*. Obtenido de cambio y variabilidad climatica en el Ecuador: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/cambio-climatico/>
- INFOAGUA. (2014). *Cuenca del Guayllabamba*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2015, de <http://www.infoagua-guayllabamba.ec/sirhcg/index.php/disponibilidad-de-agua/analisis-de-oferta-hidrica>
- Konstatinov, N. (1987). *Principios de la Hidrología*. Moscu.
- Landini, A., Martínez, D., Hugo, D., & Soza, E. (2007). *Modelos de Infiltración y Funciones de Pedotransferencia Aplicados a Suelos de Distinta Textura*. Argentina: UBA.
- Llorens, P. (2003). La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca . *Ecosistemas* .
- Mendoça, M. (2011). *Nuevo Mapeo Digital de Suelos en el Mundo* . Río de Janeiro: Embrapa Solos.

Moreno, J. (2014). Taller de Geoestadística. Quito: IEE.

NCGIA. (1990). *Qué es la ciencia de la información geográfica?* Obtenido de Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis: <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u002/u002.html>

Ordoñez, J. (2011). *Balance Hídrico Superficial*. Lima: SENHAMI.

Pérez, K. (2007). *Estimación de la Oferta Hídrica en la Cuenca Alta del Río Pita Mediante Herramientas Geoinformáticas*. Sangolquí.

PNUMA. (2010). *Manejo Integrado de Agua y Áreas Costeras*. San Salvador: Curso Sub Regional.

Pusinerí, G., Pedraza, R., & Lozeco, C. (2010). *Uso de Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica en la Modelación Hidrológica*. Universidad Nacional del Litoral.

Sabas, C. (2009). *ESTUDIO DE OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO BARBAS*. Pereira: UTP.

SENAGUA. (2009). *DELIMITACIÓN Y CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS DEL ECUADOR*. Recuperado el 12 de enero de 2016, de <http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/delimitacion-codificacion-Ecuador.pdf>

SENPLADES. (2014). *Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017*. Quito.

Serrano, J. (2011). *Regionalización espacial de series climáticas mensuales caso de estudio: Cuenca del río Guayllabamba*. Quito: EPN.

SINPAD. (2014). *¿Qué es un SIG?* Recuperado el 5 de noviembre de 2015, de Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación: <http://sinpad.indeci.gob.pe/PortalSINPAD/Default.aspx?ItemId=261>

Springall, R. (1970). *Hidrología: Primera Parte*. Mexico: UNAM, Facultad de Ingeniería.

UICN. (2008). *Manejo Integrado de la Hoya de Quito. FONAG*.

- UM. (2008). *Interpolación a partir de puntos e isoclinas*. Recuperado el 25 de noviembre de 2016, de [http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario\\_6.pdf](http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_6.pdf)
- Universidad de Murcia. (2007). *El Modelo Digital de Terreno (MDT)*. Recuperado el 14 de diciembre de 2015, de [http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario\\_7.pdf](http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_7.pdf)
- Valdivieso, P. (2011). *Incidencia en el Cambio de Uso de Suelo en los Caudales*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Vargas, G. (2004). *La Escala Zonal, Regional y Local en el Análisis del Régimen Pluviométrico del Istmo Centroamericano*. San José.
- Votano, J., Parham, M., & Hall, L. (2004). El vivir bien como respuesta a la crisis global. *Chemistry*.
- Zafir, R. (2015). *Estimación de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos mediante el método Fuzzdes, en la zona urbana de la administración zonal norte Eugenio Espejo, del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: ESPE.
- Zarzosa, N., & Núñez, A. (2002). *Sistemas de información geográfica*. Barcelona, España: Ediciones UPC.

## ANEXOS

### Anexo A

A.1. Mapa de Distribución de Estaciones Hidrometeorológicas

A.2. Mapa de Puntos de Salida de las Unidades Hidrográficas

A.3. Mapa del Modelo de Oferta Hídrica Época Seca

A.4. Mapa del Modelo de Oferta Hídrica Época Lluviosa

### Anexo B

B.1 Coeficiente de Cultivos ( $K_c$ )

### Anexo C

C.1. Datos Históricos de Estaciones Meteorológicas

C.2. Datos Históricos de Estaciones Hidrológicas